ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS DEL

E-ICES 15

DECIMOQUINTO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

23 al 25 de noviembre de 2020



ISBN 978-987-1323-66-1

ices
CENTRO INTERNACIONAL PARA ESTUDIOS DE LA TIERRA

ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS
del

E-ICES 15

DECIMOQUINTO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

23 al 25 de noviembre de 2020

UNCUYO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

ices
CENTRO INTERNACIONAL PARA ESTUDIOS DE LA TIERRA

CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica

Comisión Nacional de Energía Atómica
Actas de Trabajos Completos del E-ICES 15 : Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra / compilado por Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; Luis Lenzano ; dirigido por Martín Gómez ; editor literario Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; Luis Lenzano ; prólogo de Martín Pedro Gómez. - 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2021.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-1323-66-1

1. Ciencias Naturales. 2. Ciencias Tecnológicas. I. Gómez, Martín Pedro, comp. II. Filipussi, Dino, comp. III. Lenzano, Luis, comp. IV. Gómez, Martín, dir.
CDD 550.7



Actas de Trabajos Completos
del
E-ICES 15

Decimoquinto Encuentro del
Centro Internacional de Ciencias de la Tierra

Primer Encuentro Virtual del ICES

AUTORIDADES DEL ICES

CONSEJO DE REPRESENTANTES

Prof. Luis Lenzano (UNCUYO)

Dr. Cesar Belinco (CNEA)

Dr. Manuel Tovar (UNCUYO)

Dr. Ingomar Allekotte (CNEA)

PRESIDENTE DEL CONSEJO DE REPRESENTANTES

Mag. Ing. Alberto Vich (UNCUYO)

DIRECTOR CIENTÍFICO

Dr. Martín Pedro Gómez (CNEA)

SECRETARIA EJECUTIVA

Dra. Adalgisa Scotti (CNEA)

EDITORES

Martín Gómez, Luis Lenzano y Dino Filipussi

DISEÑO Y COMPAGINACIÓN

Dino Filipussi, Daniela Guevara Vallese, Gustavo Álvarez y Martín Gómez

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN 978-987-1323-66-1

© CNEA 2021

DIRECTOR DEL ENCUENTRO

Dr. Martín Pedro Gómez (ICES CNEA, UTN, UNSAM)

COMITÉ ORGANIZADOR

Gustavo Álvarez (ICES Mendoza CNEA)
Ana Rosa Castaño Gañán (ICES Malargüe CNEA)
Diego Cowes (ICES Buenos Aires CNEA)
Dino Filipussi (ICES Buenos Aires CNEA, UNSAM)
Felipe Genovese (UTN FRSR)
Daniela Guevara Vallese (ICES Buenos Aires CNEA)
Leticia Katzer (ICES Mendoza CONICET)
Luis Eduardo Lenzano (ICES Mendoza UNCUYO)
María Florencia Lenzano (ICES Mendoza CNEA)
Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES Buenos Aires CNEA, UNSAM, UTN)
Nicolás Núñez (ICES Buenos Aires CNEA)
Valeria Ortega Paredes (ICES Mendoza CNEA)
Diego Pérez (ICES Buenos Aires CNEA)
Laura Salgán (ICES Malargüe CONICET)
Hernán Sánchez (ICES Buenos Aires CNEA)
Adalgisa Scotti (ICES San Rafael CNEA, UNCUYO, IGAG)
Mónica Torrejón (ICES Mendoza UNCUYO)
Luisina Torres (ICES Mendoza UNCUYO)
Alejandra Vesga Ramírez (ICES Buenos Aires CONICET)
Mag. Alberto Vich (ICES Mendoza UNCUYO, IANIGLA-CONICET)
Paula Vildoza (ICES Mendoza UNCUYO)

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Mariano Agusto (UBA-CONICET)
Dr. Jorge Barón (ICES Mendoza UNCUYO)
Dr. Giovanna Cappai (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES Malargüe CNEA)
Dr. Deyan Draganov (TU DELFT, Holanda)
Mag. Ing. Guido Ferrari (UTN-FRD)
Dr. Dino Filipussi (ICES Buenos Aires CNEA, UNSAM)
Dr. César García Ubaque (UDFJC, Colombia)
Dr. Adolfo Gil (CONICET)
Dr. Martín Gómez (ICES Buenos Aires CNEA, UTN-FRD, UNSAM)
Dr. Diego González (IMM, Bologna, Italia)
Dra. Daniela Guglietta (IGAG-CNR, Italia)
Dra. Leticia Katzer (ICES Mendoza CONICET)
Dra. Clara Lamberti (UBA-CONICET)
Dra. María Isabel López Pumarega (ICES Buenos Aires)
Prof. Luis Eduardo Lenzano (ICES Mendoza UNCUYO)
Dr. Stefano Millia (IGAG-CNR, Italia)
Dr. Gustavo Neme (CONICET)
Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES Buenos Aires CNEA, UTN-FRD)
Dr. Marcelo Raponi (CITEDEF)
Dr. Linilson Rodrigues Padovese (USP, San Pablo, Brasil)

Dr. José Ruzzante (UTN FRD, UNTREF)
Dra. Laura Salgán (CONICET)
Dra. Adalgisa Scotti (ICES San Rafael CNEA, UNCUYO, IGAG)
Dra. Francesca Trapasso (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Alejandra Vesga Ramírez (ICES Buenos Aires CONICET)
Mag. Ing. Alberto Vich (ICES Mendoza UNCUYO, IANIGLA-CONICET)
Dr. Stefano Ubaldini (IGAG-CNR, Italia)

EQUIPO DE VIRTUALIDAD DEL ENCUENTRO

COORDINADORES DE SESIÓN (MODERADORES)

Mag. Ing. Ana Rosa Castaño Gañán, Mag. Ing. Guido Ferrari, Dr. Dino Filipussi, Dr. Martín Gómez, Dra. Leticia Katzer, Dra. Clara Lamberti, Prof. Luis Eduardo Lenzano, Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo, Dra. Adalgisa Scotti, Mag. Alejandra Vesga Ramírez, Mag. Alberto Vich

ASESORA DE HERRAMIENTAS VIRTUALES

Mónica Torrejón

RESPONSABLES TÉCNICOS DE SALA VIRTUAL

Mónica Torrejón, Gustavo Álvarez, Diego Pérez, Diego Cowes, Martín Gómez

ASISTENTES DE SALA VIRTUAL

Gustavo Álvarez, Ana Rosa Castaño Gañán, Daniela Guevara Vallese, María Florencia Lenzano, Diego Pérez, Valeria Ortega Paredes, Laura Salgán, Luisina Torres, Paula Vildoza

COMUNICACIÓN

POR PÁGINA WEB
Florencia Lenzano, Paula Vildoza, Mónica Torrejón

POR CORREO ELECTRÓNICO
Daniela Guevara Vallese, Dino Filipussi

DISEÑO DE PÓSTERES Y COMUNICACIONES
Paula Vildoza, Florencia Lenzano, Mónica Torrejón

PRÓLOGO

Entre el 23 y el 25 de noviembre de 2020 se realizó el Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional para Estudios de la Tierra. En esta ocasión, hemos tenido que enfrentarnos a la difícil adversidad de la pandemia de COVID 19, la cual nos llevó a organizar el E-ICES 15 de manera virtual a través de una plataforma en internet.

En principio, esta reunión estaba planificada para llevarse a cabo en la ciudad de Mendoza, en el campus de la Universidad Nacional de Cuyo, pero la coyuntura nos llevó a replantear la situación. Desde el principio tuvimos la idea firme de sostener el Encuentro en la fecha estipulada y en conjunto con los Comités Científico y Organizador se decidió de inmediato cambiar a la modalidad virtual. Entonces, se adaptó la estructura del Encuentro a esta forma de desarrollarlo y se decidió mantener el formato de sesiones orales, pósteres y conferencias plenarias. También se agregó una Jornada asociada con talleres, la presentación de un libro y más conferencias.

El desafío salió muy bien, la experiencia en el mundo virtual ha sido muy enriquecedora y se produjo un gran aprendizaje para toda la comunidad del ICES. Esta nos ha permitido superar el límite físico que produce un encuentro presencial y hemos tenido la grata sorpresa de una gran participación de científicos de muchos países, especialmente de Latinoamérica. En los días del Encuentro, incluyendo la jornada asociada, han participado más de 500 personas. Se han presentado 200 trabajos entre posters y orales, 6 conferencias plenarias, una mesa redonda y los homenajes a dos figuras importantísimas para nuestro desarrollo científico y tecnológico regional como Amílcar Herrera y Oscar Varsavsky, al cumplirse este año el centenario de sus nacimientos. En la Jornada asociada al Encuentro se realizaron un taller sobre el uso del satélite SAOCOM por parte de autoridades y personal de CONAE, así como dos conferencias en temas muy actuales e importantes como lo son género y medio ambiente, y también la presentación de un libro de antropología.

Esperando que la pandemia termine pronto, para el futuro trataremos de incorporar y adaptar estas nuevas prácticas de comunicación que hemos tenido que aprender rápidamente a utilizar por necesidad. En los próximos Encuentros E-ICES presenciales es muy probable que las sesiones virtuales queden instaladas como un complemento integrador que nos permita vencer distancias físicas.

Respecto a las Actas de Trabajos Completos, en esta oportunidad se ha recibido una gran cantidad de manuscritos, todos de excelente desarrollo.

Agradezco mucho a quienes participaron en esta reunión por la inmensa predisposición que han tenido mientras todos íbamos aprendiendo en la marcha a utilizar estos nuevos medios y hago un especial reconocimiento al grupo organizador quienes rápidamente y con mucha dedicación se adaptaron a la virtualidad.

Saludos cordiales,

Martín Gómez

Noviembre de 2020

ÍNDICE

PROPIEDADES BIOLÓGICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO AGRÍCOLA DE LA REGIÓN SEMI-ÁRIDA DE VENEZUELA BAJO DIFERENTES USOS
Aciego J., Chacín E. *1*

SENSORAMIENTO REMOTO APLICADO A LA EVALUACIÓN DE CAMBIOS AMBIENTALES EN CORDONES LITORALES ASOCIADOS AL HUMEDAL DE LA BAHÍA SAMBOROMBÓN
Ali Santoro V., Borzi G., Tanjal C., Carol E. *8*

GEOLOGÍA DEL CONO ALUVIAL DE LA CIUDAD DE CATAMARCA – ARGENTINA
Alvarez M. J., Eremchuk J. E. *17*

VARIACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA ENTRE LOS AÑOS 1990-2020 EN UNA CUENCA SERRANA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Aperlo D., Gaspari F. J. *26*

DESASTRES PEQUEÑOS E INVISIBILIZADOS. LAS AFECTACIONES EN LA PRODUCCIÓN FAMILIAR DE LA PROVINCIA DE MISIONES POR EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS: PRIMERA APROXIMACIÓN
Bach J. T., Patat G., Pereira S. G., Viand J. M. *36*

CARACTERIZACIÓN GRAVIMÉTRICA DE LA CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE
Bahía M. E., Longo M. y Ravazzoli C. L. *45*

IMPORTANCIA DE LA CREACION DEL PARQUE ESPELEOLOGICO POTI MALAL – MALARGÜE – MENDOZA
Benedetto C. A. *57*

METODOLOGÍA DE RELEVAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA APLICADA A LA CIUDAD DE SAN RAFAEL (MENDOZA, ARGENTINA)
Biondi M. L., Negreira, G. A., Crisnejos M. L., Martínez G. M., Guerci A., Soengas C. J., Villarroel I. M., Reviglio H. A. *69*

EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO DIAMANTE (MENDOZA, ARGENTINA)
Biondi M. L., Genovese F. V., Biondi R. A., Castro C. A., Pallares Lopez V., Galat M. A. *79*

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ACUÍFEROS CON APOYO DE ISÓTOPOS ESTABLES (^{18}O Y ^{2}H) EN ALEJANDRO ROCA. CÓRDOBA. ARGENTINA.
Blarasin M., Cabrera A., Matteoda E., Becher Quinodoz F., Eric C., Lutri V., Felizzia J., Giacobone D., Giuliano Albo J. *86*

ACTIVIDAD TAMBERA EN EL NORESTE BONAERENSE Y SU IMPACTO EN LOS ACUIFEROS UTILIZADOS PARA CONSUMO
Borzi G., Tanjal C., Santucci L., Galliari J., Villalba E., Stein J., González M., Carol E. *97*

USO DE ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL AGUA DE SUMINISTRO DOMÉSTICO PARA OPTIMIZAR EL MODELO HIDROGEOLÓGICO EN RÍO CUARTO (CÓRDOBA ARGENTINA)
Cabrera A., Blarasin M., Lutri V., Giacobone D., Matteoda E., Eric C., Felizzia J. *106*

GEOCHEMICAL AND VOLUMETRIC CONTRAST OF LAVA FLOWS AND SCORIA CONES IN THE NEGROS DE ARAS VOLCANIC FIELD, NORTHERN CHILE
Cafaggi S., Ureta G., Aguilera M., Vilches M., Torres I., Aguilera F., Tranne C. A., Dinelli E., Zimmer M. *115*

TOMOGRAFÍA SÍSMICA LOCAL EN 3D DE ESTRUCTURAS PRE-CENOZOICAS EN EL MARGEN COSTERO DE CHILE CENTRAL: SISTEMA DE FALLAS DE PICHILEMU
Calle-Gardella D., Comte D., Farías M., Roecker S., Rietbrock A. *127*

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS PRODUCTIVOS CON INTENSIFICACIÓN GANADERA BOVINA. TUCUMÁN, ARGENTINA.
Canelada Lozzia M. I., Rearte M., Castro L., Guillén S. C., Grancelli S. M., Vidal P. J. *139*

PERIODICIDADES EN INDICADORES PALEOCLIMÁTICOS DURANTE EL PLEISTOCENO TARDÍO
Cappellotto L., Orgeira M. J., Velasco Herrera V. M. *149*

INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS AL FENÓMENO DE EROSIÓN REGRESIVA EN EL RÍO COCA
Carranco F., Pulupa R., Coronel O., Reina J., Romero C., Toainga S. *157*

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS SUCESIONALES ECOLÓGICOS POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN EN EL SUR DE MENDOZA
Castaño Gañán A. R. *167*

MODELO PARA ACELERAR LA PREDICCIÓN DE FENÓMENOS EN MÉTODOS EVOLUTIVO-POBLACIONALES
Caymes Scutari P., Bianchini G., Tardivo M. L. y Méndez Garabetti M. A. *178*

ESTUDIO DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA CIUDAD DE FORMOSA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES
Checozzi F., Boggio N., Vorobioff J. *187*

APORTES DEL RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO A LA HIDROGEOLOGÍA LOCAL EN EL ABANICO ALUVIAL DEL CAPAYÁN, VALLE ANTINACO-LOS COLORADOS, LA RIOJA
Clara X., Miguel R. E. *199*

DETECCIÓN DE CAMBIOS EN EL ÁREA CULTIVADA DEL VALLE INFERIOR DEL RÍO NEUQUÉN ENTRE 2002 Y 2019
Cogliati M. G., Finessi F. G. *207*

FACTORES QUE PROPICIARON LAS INUNDACIONES EN LA LOCALIDAD DE LA EMILIA, PARTIDO DE SAN NICOLÁS, PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Conesa C., Fucks E. E., Pisano M. F. *214*

TÉCNICA DE INTERROGACIÓN NEUTRÓNICA PARA LA DETECCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS EN CONTENEDORES PORTUARIOS
D´Amico N. M. B., Mayer R. E. *227*

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACION -ESCORRENTIA EN LA CUENCA ALTA DEL RIO SAUCE CHICO. PROVINCIA DE BUENOS AIRES
de Antueno L., Gaspari F. J., Guzmán Guaraca A. *238*

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA COMARCA TURÍSTICA SERRANA DE VENTANIA
Delgado M. I., de Antueno L., Gaspari F. J. *249*

IMPACTO DE LAS ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN SATELITAL EN LOS CAUDALES DEL RÍO URUGUAY
Díaz G. M., Doyle M. E., Chavez L. M. *260*

VALORACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTEMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS CON INVEST (SDR), EN UNA CUENCA SERRANA TRANSFORMADA. CASO DEL RIO SAUCE CHICO BUENOS AIRES, ARGENTINA
Díaz Gómez A. R., Gaspari F. J. *273*

MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA PARA ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO DE CALIDAD DE AIRE
Diaz J. A., Berri G. J. *285*

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS AGUAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN UNA CUENCA DEL FALDEO NORTE DEL SISTEMA SERRANO DE TANDILIA
Dipardo B., Barranquero R. S., Varni M. R., Landa R., Etcheverria S. G., Ruiz de Galarreta V. A. *295*

PATRÓN DE EXACTITUD CARTOGRÁFICA (PEC) DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO DE LA BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL CONTINUA DEL ESTADO DE AMAPÁ: ESTUDIO DE CASO DE LA CIUDAD DE MACAPÁ, BRASIL
dos Santos Filho H., Cornero C., Pereira A. *307*

LA UTILIZACIÓN DE SIG LIBRES, COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL RÍO QUINTO EN EL TRAMO DEL MUNICIPIO DE VILLA MERCEDES, SAN LUIS, ARGENTINA
Dueñas D. A., Sosa G. del R. *315*

ANÁLISIS DE NIVELES HIDRÁULICOS Y ESPESORES DE ACUITARDO EN EL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO PAMPEANO – PUELCHE, PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Fabiano M., Sánchez Caro L., Rodrigues Capítulo L., Carretero S. C. *324*

ORIGEN DE LOS FLUJOS DE AZUFRE FUNDIDO EN EL VOLCAN LASTARRIA, UNA PERSPECTIVA DESDE LA GEOQUIMICA DE GASES VOLCÁNICOS
Fernández B., Inostroza M., Aguilera F. *335*

MAPA PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA PARA BOLIVIA
Fernández G. A., Nieto M., Griffiths T., Arce W., Assumpcao M. *347*

PERSPECTIVAS SOBRE AMÍLCAR O. HERRERA EN EL CENTENARIO DE SU NACIMIENTO: GEOCIENCIAS, "MODELO MUNDIAL LATINOAMERICANO" Y COMPROMISO HUMANISTA
Fernández Guillermet A. *358*

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURA EN HORMIGÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA Y DESCOMPOSICIÓN EMPÍRICA EN MODOS
Flores Rodríguez J. J., Zitto M. E., Muszkats J. P., Sassano M., Piotrkowski R. *370*

ALGAS MARINAS: DESAFÍOS DE UN BIOADSORBENTE
Foglino V. P., Salomone V. N. *383*

MODELADO 3D DE FRACTURAS HIDRÁULICAS EN MACIZOS ROCOSOS
Fuentes N. O. *392*

MODELADO FISICOQUÍMICO DE LA BIODEGRADACION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS Y SU COMPARACIÓN CON CASOS REALES EN EL CENTRO OESTE DE ARGENTINA
Gálvez J., Cantero J., Lopez A., Vardaro S., Pineda I. *398*

ESTUDIO DE PERFILES ALARES PARA MICROAEROGENERADORES HAWT A BAJO NÚMERO DE REYNOLDS
Ganiele M. J., Nicoletti P., Villanueva A. F., Montenegro S. O., Lingeri S. D., Anello D. C., Ponzoni L. M. E. *410*

EVALUACIÓN DE ASPECTOS HIDRODINÁMICOS, GEOQUÍMICOS Y APTITUDES DE USO DE CAPAS ACUÍFERAS CONFINADAS EN LA PLANICIE LOÉSSICA DE MARCOS JUÁREZ
Giacobone D., Blarasin M., Matteoda E., Lutri V., Cabrera A., Currell M., Cendon D., Cabrera A. E. *422*

DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UN ÁREA URBANA FORESTADA, A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA
Giovenale V., Gaspari F. J. *434*

SONDA NEUTRÓNICA PARA EXPLORACIÓN URANÍFERA. CORRECCIÓN POR STANDOFF
Gómez Méndez I., Mayer R. E. *446*

COMPARACIÓN DE LAS TASAS DE EMISIÓN DE SO_2 EN PLUMAS VOLCÁNICAS DE LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA (NORTE DE CHILE) MEDIANTE EL USO DE ESPECTRÓMETRO ÓPTICO (DOAS) Y CÁMARA UV (PICAM)
González C., Layana S., Wilkes T., Aguilera F. *456*

MODERNIDAD, OASIS Y DESIERTO: EL ARBOLADO PÚBLICO Y LA CONFIGURACIÓN DEL ESPACIO EN LA CIUDAD DE SAN RAFAEL, MENDOZA, ARGENTINA
Guerci A., Paulides L. S., Cornejo C., Farina L., Mondeja S., Freire L. F., Negreira G. *468*

GEOLOGÍA POLÍTICA. VIGENCIA DE LOS PENSAMIENTOS DE AMÍLCAR HERRERA EN MATERIA DE RECURSOS MINERALES DE ARGENTINA Y AMÉRICA LATINA
Guerriero L., Kohler M. C., Barros Cortés F. *479*

ANÁLISIS DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL SEGÚN LA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE DEL SUELO EN UNA CUENCA SERRANA BONAERENSE
Guzmán Guaraca A., Gaspari F. J., de Antueno L. *490*

COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DE PLOMO POR BIOMASA FÚNGICA, BENTONITA Y CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL
Hidalgo N. A., Bustos D. A., Mamaní A., Bustos D. *499*

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA "HIGH DEFINITION SURVEYING" EN LA INGENIERÍA
Huaman Tena H. *508*

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO MENDOZA Y SUS SUBCUENCAS. MENDOZA. ARGENTINA
Lauro C., Vich A. I. J., Moreiras S. M., Otta S., Vaccarino E., Bastidas L. *520*

ANÁLISIS ESPACIAL DE LA DEGRADACIÓN EN FORMACIONES VEGETALES DE LA RESERVA PARA PARQUE NACIONAL SAN RAFAEL, PARAGUAY, PERIODO 2005- 2019
Llamas T., Villalba J., Amarilla S., Pérez De Molas L., González L. *532*

DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE BAJO COSTO EMPLEANDO HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE
López Angulo C. A., Scala F., Torrejón M. A. *542*

DISTRIBUCIÓN AREAL DE ATRAZINA Y MODELACIÓN DE SU TRANSPORTE HACIA EL ACUIFERO LIBRE EN UNA PLANICIE FLUVIO-EÓLICA
Lutri V., Blarasin M., Matteoda E., Giacobone D., Becher Quinodoz F., Cabrera A., Giuliano Albo J., Bachetti R. *552*

ANÁLISIS DE AMENAZAS Y PERCEPCIÓN DEL RIESGO EN LOS ALREDEDORES DEL PASO INTERNACIONAL DE FUTALEUFÚ
Maino Minetto M., Colavitto B., Winocur D. *564*

ANÁLISIS DE RIESGO: COVID-19 VS. TERREMOTO. UN ESCENARIO POSIBLE
Maldonado N. G., Cueto A., Maldonado I. A., Buss D. L. *576*

MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES BASADOS EN IMÁGENES SAR: VOLCÁN LANÍN
Marsilli D. J. A., Balbarani S., Monteros E. *587*

BALANCE HÍDRICO APLICANDO TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN DE CUENCAS FLUVIALES
Montealegre Medina F. A., Gaspari F. J. *599*

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS COEFICIENTES ESTÁTICOS DE TORQUE DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS
Montenegro S. O., Nicoletti P., Villanueva A. F., Ganiele M. J., Lingeri S. D., Quinteros L., Ponzoni L. M. E. *611*

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG AL ANÁLISIS MORFOMETRICO DE LA CUENCA, DEL RÍO SAN PABLO, DEPTO. CAPAYÁN, CATAMARCA
Morales G., Lobo A. P., Purulla F. B. *623*

CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO EN ESTABLECIMIENTOS RURALES DEL PARTIDO DE MAGDALENA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Moreiro Varela J., Di Lello C., Delgado M. I. *635*

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL PLATA
Muiños Machado G., Doyle M. E. *647*

EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES EN LA BARDA DEL ÑIRECO
Müller M., Zárate A., Espert N. *657*

CUÑAS DE SUBDUCCIÓN Y EROSIÓN TECTÓNICA INFERIDAS A PARTIR DE EVIDENCIAS SISMOLÓGICAS EN EL MARGEN CHILENO
Navarro-Aránguiz A., Comte D., Calle-Gardella D., Farías M., Roecker S., Rietbrock. A. *669*

METODOLOGIA DE ESTUDIO DE ROCAS CALIZAS APLICADA A LA INDUSTRIA CALERA
Negrelli M. M., Arroqui A., Soria T. B., Castro G. A. *681*

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD CALERA. ESTUDIO PRELIMINAR COMPARATIVO EN LOS DEPARTAMENTOS JÁCHAL – ALBARDÓN, PROVINCIA DE SAN JUAN
Neyra G., Negrelli M. M., Soria M. V., Mendéz M. J., Ramirez M. S. *691*

DISEÑO DE MICROTÚNEL DE VIENTO PARA ENSAYOS DE MODELOS DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA NACIONALES
Nicoletti P., Villanueva A. F., Ganiele M. J., Montenegro S. O., Lingeri S. D., Anello D. C., Quinteros L., Ponzoni L. M. E. *703*

ANÁLISIS DE SUELOS PARA ESTUDIAR SEGURIDAD SOCIOAMBIENTAL DE ZONAS QUE ESTUVIERON INUNDADAS EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN. PROPUESTA DE ESQUEMA DE MUESTREO PARA LÍNEA BASE
Ortiz F., Barbini A., Ceballos M., Colla J., Tabarez M., Previtali E., Corvalán Moya C. *715*

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO Y CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO EN EL PIEDEMONTE DE LA CUENCA EL POTRERILLO, CATAMARCA, ARGENTINA
Ortíz Grau M. V., Serra M., Lamas C., Niz A. E. *728*

ESTUDIO EVOLUTIVO DE LOS MALLINES DEL NORTE NEUQUINO A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL Y CLIMATOLÓGICA
Ostertag G., Tesoniero M. A., Bertani L. A., Caso M. *738*

VARIACIONES HIDROQUÍMICAS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS UTILIZADOS PARA ABASTECIMIENTO GANADERO EN UN SECTOR DEL PARTIDO DE GENERAL LAVALLE
Oviedo B., Pasquale Pérez M., Galliari M., Borzi G., Carol E. *747*

MODELACIÓN DE PROCESOS GEOQUÍMICOS EN RELACIONES AGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA EN EL ÁMBITO RURAL DE CANALS
Pascuini M., Cabrera A., Blarasin M., Eric C., Matteoda E., Becher Quinodoz F., Lutri V., Giacobone D. *754*

MODELADO ANÁLOGO DE PLIEGUES POR PROPAGACIÓN DE FALLA: OBTENCIÓN Y COMPARACIÓN DEL CAMPO CINEMÁTICO
Plotek B., Guzmán C., Cristallini E. *764*

FACTORES QUE CONTROLAN LA CONCENTRACIÓN DE FLÚOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL ARROYO LAS PEÑAS, SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA, ARGENTINA
Prámparo, S., Blarasin, M., Giacobone, D., Becher Quinodoz, F. y Degiovanni, S. *776*

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS EN CONDICIONES CLIMÁTICAS VARIABLES
Principiano L., Álvarez O. G., Fuentes N. O. *788*

IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA "BRISA DE MAR Y TIERRA" EN EL RÍO DE LA PLATA
Queirel J. M., Berri G. J. *800*

INVERSION OF POROELASTIC PARAMETERS AND SONIC WAVE VELOCITY MODELING IN VACA MUERTA FORMATION
Ravazzoli C. L., Blanco G. *809*

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL ANTE INCENDIOS FORESTALES EN CUENCA DEL ARROYO VENTANA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES.
Rodríguez Souilla J., Gaspari F. J. *821*

ANÁLISIS DE PROVENIENCIA EN SECUENCIAS MESOZOICAS DE LA CORDILLERA CUTÚCU, REGIÓN SURORIENTAL DEL ECUADOR
Romero C. W., Condoy D., Menéndez B. E., Gallardo O. A. *834*

TÉCNICAS DE APOYO EN LA CARACTERIZACIÓN DE MINERALES GRANULARES (ÁRIDOS) DE AMPLIO USO EN LA INDUSTRIA
Romero M., Negrelli M., Neyra G., Cano E. *846*

EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS SOBRE LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES ASOCIADAS A *CALOTROPIS PROCERA*
Rosas J., López- Hernández I. D., Toro M. *855*

TOLERANCIA DEL VETIVER (*CHRYZOPOGON ZIZANIOIDES*) A SUELOS CONTAMINADOS CON CRUDO EXTRAPESADO
Rosas J., García A. A., Inojosa Y., De Sisto, España M. *864*

VARIACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN EL ACUÍFERO COSTERO DE VILLA GESELL, ARGENTINA: RESULTADOS PRELIMINARES
Sánchez Caro L., Carretero S. C., Fabiano M., Laurencena P., Isla F. I. *871*

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MIRANDA (ARGENTINA) A PARTIR DE DIFERENTES MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN
Sánchez Caro L., Alfaro D. N., López L. *883*

DISTRIBUCIÓN DE DOMOS CUATERNARIOS EN LA ZONA VOLCÁNICA CENTRAL (ZVC), NORTE DE CHILE (18.07° – 27.12°S)
Scheinost A., Ureta G., Aguilera F., Torres I. *895*

DETERMINACIÓN DE VARIABLES HIDRÁULICAS EN BIORREACTORES
Scotti A., Cerioni J., Visciglia M., Cerioni S., Biondi R., Turano J., Bianchini J., Osisnaldi G., Gómez M. *902*

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MULTIDISCIPLINARY STRATEGY FOR GALLIUM, IRON AND MANGANESE RECOVERY FROM MINING RESIDUES IN A CONTEXT OF CIRCULAR ECONOMY
Scotti A., Milia S., Silvani V., Cappai G., Guglietta D., Trapasso F., Belardi G., Salvatori R., Tempesta E., Passeri D., Ubaldini S., Godeas A., Babay P., Gonzalez F., Leguizamón R., Gómez M. *910*

EVOLUCIÓN DE LOS MANANTIALES DEL DISTRITO VICHIGASTA, LA RIOJA, ARGENTINA
Silva S. H., Rodríguez. C. I., Miguel R. E. *923*

CARACTERIZACION HIDROQUÍMICA PRELIMINAR DEL AGUA UTILIZADA PARA CONSUMO EN EL BALNEARIO MARISOL, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA
Stein M. J., Borzi G., Tanjal C., Di Lello C. *933*

RELACIÓN ENTRE LAS PRECIPITACIONES Y LAS VARIACIONES PIEZOMÉTRICAS EN LA QUEBRADA DEL RÍO POMÁN – CATAMARCA – ARGENTINA
Tálamo E., Vilches F., Díaz Ramos F., Morales G. *940*

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN Y ESPESOR DE UN GLACIAR DE ESCOMBROS ACTIVO
Toledo M. A., Ahumada A. L., Ibáñez Palacios G. P. *947*

RECURSOS GEOMORFOLÓGICOS CON POTENCIAL GEOTURÍSTICO EN LA ZONA DE VILLA PEHUENIA, NEUQUÉN
Toscani F., Jurio E. M. *957*

RELACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROBLEMÁTICAS EN EL USO DEL TERRITORIO EN HUMEDALES DE LA FRANJA COSTERA, CUENCAS DEL NE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES
Trovatto M. M., Balduzzi M. A., Gil J., Salvioli M. L., Cipponeri M., Calvo G. *968*

GEOCHEMICAL AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF THE CHILIQUES VOLCANO
Ureta G., Sepúlveda J. P., Scheinost A., Aguilera F., Zimmer M. *980*

APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN BARRIOS VULNERABLES
Vazquez J. J., Brown Bustos N. D. *992*

ANÁLISIS PRELIMINAR DEL CAMPO ELÉCTRICO Y DATOS DEL GOES 16 SOBRE 4 TORMENTAS EN ARGENTINA
Velazquez Y.R. *1001*

ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE EMISIÓN ACÚSTICA
Vesga-Ramírez A., Camilion E. Y Gómez M. P. *1011*

EFFUSION RATE DETERMINATION THROUGH ANALYSIS OF THE LAVA FLOW DYNAMICS: THE CASE OF TILOCÁLAR LAVA FLOWS, NORTHERN CHILE
Vilches M., Ureta G., Aguilera M., Aguilera F. *1019*

CARACTERIZACIÓN DE LA COLONIZACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES (HONGOS *GLOMEROMYCOTA*) A PARTIR DE RIZÓSFERAS DE PLANTAS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA* L.) DE LA HACIENDA COCOLLAR, EDO. MONAGAS, VENEZUELA.
Villalba L., Toro M., López-Hernández D., Cabrera R. *1030*

FLUJOS DE DETRITOS RECIENTES EN LOS ALREDEDORES DEL CERRO LAS LEÑAS Y LA RUTA N° 7, MENDOZA. ANÁLISIS DEL RIESGO GEOLÓGICO ASOCIADO
Winocur D., Benitez A., Hurtado M. B., Negri Martin M. C. *1042*

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CLOACALES APLICABLE AL REFUGIO SAN MARTÍN
Zárate A., Paz Zalazar R., D´Amico N. *1055*

PROPIEDADES BIOLÓGICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO AGRÍCOLA DE LA REGIÓN SEMI-ÁRIDA DE VENEZUELA BAJO DIFERENTES USOS

Aciego J. y Chacín E.

Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela

e-mail; juanaciego@gmail.com

RESUMEN

Con el objetivo de comparar las propiedades biológicas y químicas de un suelo salino con clima semi-árido de la Depresión de Quibor, se seleccionó: suelo bajo cultivo de cebolla con un uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes, suelo en condición de barbecho (descanso) por un periodo de 1.5 años, suelo bajo pastura por 10 años y suelo bajo condiciones naturales, que fueron sometidos a análisis de laboratorio al inicio y al final del ciclo de cultivo. El suelo bajo cultivo presentó las concentraciones más bajas de carbono microbiano, indicador de poblaciones microbianas de menor tamaño, incluso que el suelo bajo condiciones naturales, que presenta una importante limitación en disponibilidad de agua y nutrientes (CO, P y K). Los suelos en condición de barbecho y cultivo al inicio del ciclo presentan valores más altos de conductividad eléctrica lo cual puede ser un indicador de un proceso de salinización debido a la aplicación de fertilizantes. En el suelo bajo cultivo la concentración de carbono microbiano al final del ciclo de cultivo disminuyó a la mitad y la actividad microbiana medida como respiración ($C\text{-}CO_2$) aumentó a casi el doble, lo que trae como consecuencia que el coeficiente de respiración específica (qCO_2) casi se triplicó. Lo anterior es una evidencia de que al final del ciclo de cultivo la biomasa microbiana del suelo se encuentra sometida a estrés posiblemente debido a la aplicación de agroquímicos. El suelo bajo pasto presenta mejores propiedades biológicas que los suelos bajo otros tipos de usos (agrícola, barbecho y condición natural), posiblemente debido a que presenta mayores contenidos de CO y valores más bajos de salinidad.

Palabras Claves: actividad microbiana, agroquímicos, biomasa microbiana, suelos salinos.

INTRODUCCION

La depresión de Quibor representa un área agrícola importante en la producción de cebolla, tomate y pimentón en Venezuela (FUDECO, 2004). En sus suelos, las condiciones de clima semi-árido y las limitaciones de drenaje favorecen el proceso natural de salinización. Adicionalmente, la extensión e intensificación de la actividad agrícola ha conducido a la sobre-explotación de los acuíferos en los últimos 30 años, provocando el abatimiento de los niveles estáticos y la elevación de la CE del agua (SHYQCA, 2003), con el consiguiente aumento de los riesgos de salinización de los suelos. Los usos de la tierra bajo manejo convencional han conllevado a una disminución de la concentración de materia orgánica y fósforo y a un incremento de la conductividad eléctrica en suelos de la depresión de Quibor (Torres et al., 2017). Algunos estudios han demostrado que la salinidad afecta negativamente la biomasa microbiana del suelo (Rietz y Haynes, 2003; Tripathi et al., 2006, Mendoza et al., 2012). Por otra parte, el uso agrícola convencional con uso intensivo de agroquímicos como fertilizantes y plaguicidas puede tener efectos en las comunidades microbianas del suelo (Tsiafouli et al, 2014; Mogollón et al., 2015). A diferencia de los atributos físicos y

 ISBN 978-987-1323-66-1

químicos, la relación de los atributos biológicos con la salinidad y el manejo de los suelos han sido poco estudiada en la zona agrícola de Quibor. Por tal razón, esta investigación se realizó para comparar las mediciones de biomasa microbiana, actividad microbiana y las propiedades químicas de suelos bajo diferentes condiciones de uso y manejo.

METODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Descripción del área de estudio

Los suelos se ubicaron en la hacienda "El Caujaral" bajo las coordenadas 0433401 E 1099654 N a 677 msnm y 0432640 E 1099035 N 683 msnm. Se usaron muestras alteradas de suelos de 0 - 20 cm de profundidad. pertenecientes a la serie de suelo Quíbor Typic Haplocambids arcilloso fino, isohipertérmico, mixto, calcáreo (Pérez et al., 1995), en lotes de terreno que han estado bajo producción agrícola durante varios años, principalmente con cultivos hortícolas como cebolla, pimentón, maíz dulce y patilla. En años recientes, en estos suelos se ha venido aplicando las técnicas de rotación de cultivos y descanso del suelo o barbecho, con el propósito de romper el ciclo de ciertos fitopatógenos que han causado mermas en las cosechas y reducir el empleo de plaguicidas. Se seleccionaron cuatro lotes de suelos con historiales de manejo diferentes. Un suelo cultivado con cebolla durante un periodo prolongado, con un uso intensivo de plaguicidas, un suelo en barbecho durante 18 meses, un suelo bajo condiciones naturales y un suelo bajo pasto. En el suelo bajo cultivo de cebolla se realiza un manejo convencional intensivo con control químico de plagas y enfermedades y fertilización, también se aplican de 15 a 20 Mg ha^{-1} de enmiendas orgánicas (compost) en forma fraccionada: 50% se incorpora antes de la siembra y el resto durante el ciclo de cultivo, esto se repite para cada cultivo de la rotación. Se realizaron determinaciones de propiedades microbiológicas y químicas de todos los suelos, al inicio y al final del ciclo del cultivo de la cebolla

Suelos, muestreo y preparación

Las muestras de suelo se tomaron con barreno de 10 cm de diámetro, para un total de 20 sub-muestras que fueron mezcladas en una sola muestra compuesta para cada tipo de uso de suelo diferente. Cada muestra fue dividida en dos porciones para análisis químico y microbiológico, respectivamente. Las muestras para análisis microbiológico, fueron colocadas en bolsas de polietileno previamente identificadas, y guardadas bajo refrigeración a 4 o C hasta su uso. Estos suelos fueron tamizados (<2 mm) separadamente en el laboratorio y su materia seca determinada (105 ^{o}C, 24 h), luego fueron ajustados a 40% de su capacidad de retención de humedad y sometidos a pre-incubación por 7 días a 25 ^{o}C para permitir que la actividad microbiana declinara después de la perturbación inicial (Jenkinson, 1988). Los suelos para análisis químico fueron secados al aire y tamizados (<2 mm).

Análisis químico del suelo

Conductividad eléctrica (CE) y pH fueron medidos con conductímetro y potenciómetro respectivamente, ambos en relación 1:2,5 suelo:agua (peso/peso). Las concentraciones de elementos: fósforo disponible (P) con extracción por el método de Olsen y determinación colorimétrica en Spectronic, potasio disponible (K) con extracción por el método de Olsen y determinación por absorción atómica (Jackson, M. 1964). El carbono orgánico (CO) por el método de oxidación parcial húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) al 8%, en presencia de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 al 98%) y determinación colorimétrica a 600 nm de longitud de onda (Walkley y Black, modificado por Heanes, 1984).

Análisis microbiologico del suelo

Biomasa microbiana

Las mediciones del C en biomasa microbiana (CBm) fueron realizadas por el método de fumigación-extracción con cloroformo (Vance et al., 1987). El C orgánico en los extractos de suelo fue medido por digestión ácida y posterior titulación regresiva con sulfato de amonio ferroso 0.4 M usando como indicador la solución compleja de 1,10-fenantrolina-sulfato ferroso (Grace et al., 2003). El CBm es calculado de Bc = 2.64 Ec, donde Ec = C extraído del suelo fumigado – C extraído del suelo no fumigado, y expresado como mg C kg^{-1} suelo

Actividad microbiana

En la respiración basal el C producido como C-CO_2 fue determinado capturando el CO_2 en una trampa de alcali con NaOH 1M (25 ml) y titulando con HCl 1 M (Tinsley et al., 1951). Cada porción húmeda de suelo (50 g, en base a peso de suelo seco en estufa) fue colocada en un frasco de vidrio (100 ml) el cual fue luego colocado dentro de un frasco de vidrio de 4 l, con un vial con 25 ml de NaOH 1 M y 10 ml de agua destilada en el fondo del frasco grande para mantener la humedad. El frasco de 4 l fue cerrado con tapa plástica hermética. Tres réplicas de un tratamiento blanco sin suelo también fueron preparadas. Después de un periodo de incubación de 10 días, cada vial con NaOH fue titulado con HCl 1M añadiendo previamente 2 ml de $BaCl_2$ 0,5 M con el fin de precipitar el CO_2 absorbido y con 4 gotas de solución de fenolftaleina al 1% como indicador. El cociente de respiración específica o de estrés metabólico es calculado como qCO_2 = C-CO_2 / CBm, y expresado como mg C-CO_2 g^{-1} Cbm d^{-1}.

Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANAVAR), pruebas de media de la diferencia significativa de Tukey y análisis de correlación a un nivel de p = 0.01, utilizando el paquete estadístico INFOSTAT Versión 1.1 (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico del suelo

Las propiedades químicas de los suelos presentaron diferencias similares entre suelos bajo diferentes usos, en el inicio y al culminar el ciclo del cultivo de cebolla. El suelo bajo pasto presento significativamente ($p \leq 0,01$) la más alta concentración de CO, seguido del suelo bajo cultivo, y el suelo bajo condición natural la más baja concentración. La salinidad de los suelos, medida por la CE fue significativamente ($p \leq 0,01$) más alta en el suelo en barbecho o descanso, seguido del suelo bajo cultivo, y más baja en la condición natural. El pH fue ligeramente alcalino en todos los suelos, sin embargo, resulto ligeramente más alto en la condición natural. Las concentraciones de P y K disponibles fueron significativamente ($p \leq 0,01$) más altas en barbecho, y seguidas del suelo bajo cultivo (Tablas I y II).

Propiedades microbiológicas del suelo

La biomasa microbiana (CBm) fue significativamente ($p \leq 0,01$) más alta en el suelo con pasto y más baja en el suelo bajo cultivo, tanto al inicio como al final del ciclo de cultivo (Tablas I y II). La actividad microbiana medida por la producción de CO_2 fue significativamente ($p \leq 0,01$) más alta en el suelo con pasto y más baja en los suelos bajo cultivo y barbecho. El cociente de estrés metabólico qCO_2 fue significativamente ($p \leq 0,01$) más bajo en suelo en barbecho, y más alto en condiciones naturales y de cultivo. Las correlaciones entre las propiedades microbiológicas y químicas de los suelos (Tabla III) muestran que el CBm y la respiración tuvieron una relación significativamente

 ISBN 978-987-1323-66-1

($p \leq 0,01$) positiva al inicio y al final del cultivo. A su vez, Cbm y la respiración tuvieron una correlación significativamente ($p \leq 0,01$) positiva con el CO, mientras que la respiración tuvo una relación significativamente ($p \leq 0,01$) negativa con la CE al final del ciclo del cultivo.

Las propiedades químicas de los suelos estudiados como son la alta CE y pH alcalinos debido a la presencia de sales disueltas en la solución del suelo, y las bajas concentraciones de CO debido al bajo aporte de la biomasa vegetal nativa, están asociadas a las condiciones semi-áridas de la zona (Casanova, 2005). El uso agrícola intensivo de estos suelos puede tener efecto sobre las propiedades químicas. Los suelos que presentaron CE más alta son los que han tenido aplicación de riego y fertilización, como aquellos bajo cultivo y barbecho. La CE es más alta en barbecho posiblemente porque este suelo no ha recibido agua de riego junto con los abonos orgánicos que recibió el suelo bajo cultivo de cebolla en el mismo periodo, y que contribuyen a disminuir la concentración de sales disueltas, tal como lo señalan Mendoza et al. (2012) para estos mismos suelos. La aplicación de fertilizantes inorgánicos también en el cultivo de cebolla, así como la recibida en el pasado por el suelo bajo barbecho son responsables de las concentraciones más altas de P y K disponibles. El tipo de cobertura vegetal influye en la concentración de CO en estos suelos, el pasto aporta de manera continua biomasa al suelo a través de sus raíces, mientras que los suelos bajo cultivo reciben el aporte de los restos de cosecha, y de malezas en el caso del barbecho; el suelo en condición natural recibe de los aportes de la hojarasca y raíces de las plantas que crecen de manera espontánea y que dependen del corto periodo lluvioso o del ascenso del nivel freático en el periodo seco.

Tablas I. Propiedades químicas y microbiologicas de los suelos al inicio del ciclo del cultivo

Condición	CO mg C kg^{-1}	pH	CE µS cm^{-1}	Respiración mg C-CO_2 kg^{-1} d^{-1}	CBm mg C kg^{-1}	P mg kg^{-1}	K mg kg^{-1}	qCO_2
Condición Natural	7154,32b (1043,3)	7,82a (0,087)	207,51c (28,59)	23,09b (1,64)	212,28c (27,94)	6,21c (1,66)	64,72b (21,38)	118a (10)
Barbecho	9314,44b (424,0)	7,53b (0,039)	3241,87a (167,788)	17,60 c (1,88)	319,83b (55,78)	108,61a (21,31)	730,00a (150,19)	55b (6)
Pasto	21408,71a (3768,68)	7,64b (0,09)	339,53c (40,61)	39,6a (1,61)	558,81a (63,54)	70,84b (8,83)	33,5b (4,06)	71b (6)
Cultivo	10096,93b (208,36)	7,57b (0,10)	2305,28b (364,74)	11,78d (4,27)	156,00c (42,65)	78,43b (4,24)	177,18b (7,13)	76ab (3)

Los valores mostrados son los promedios de 12 mediciones para cada condición y están expresados en base a peso de suelo seco en estufa (105 ºC, 24h). Los valores entre paréntesis corresponden a las desviaciones estándar, las letras minúsculas señalan diferencias significativas ($p \leq 0,01$)

Las propiedades biológicas estudiadas confirman el efecto positivo de las propiedades químicas como la concentración de CO sobre la biomasa microbiana y la respiración (Aciego y Brookes, 2008, 2009), así como el efecto negativo de la salinidad. Los suelos en condición de barbecho y bajo cultivo de cebolla presentan CE mucho mayores que los suelos bajo pasto y en condición natural, siendo esto una limitante para el crecimiento de las poblaciones microbianas. Al respecto, Mendoza et al. (2012) señalan que la salinidad parece tener un efecto negativo sobre los microorganismos, como

consecuencia del estrés que produce la alta presión osmótica por la alta concentración de sales en la solución del suelo, y que además de afectar el CBm y el C-CO_2 con valores menores, el qCO_2 aumenta porque más CO es usado para respiración por unidad de biomasa microbiana y menos CO es usado para síntesis celular.

Tabla II. Propiedades químicas y microbiológicas de los suelos al final del ciclo del cultivo

Condición	CO mg C kg^{-1}	pH	CE µS cm^{-1}	Respiración mgC-CO_2 kg^{-1} d^{-1}	CBm mg C kg^{-1}	P mg kg^{-1}	K mg kg^{-1}	qCO_2
Condición Natural	7127,14c (339,86)	7,91a (0,067)	191,7c (29,67)	36,4b (7,2)	293,18b (25,53)	5,78d (0,95)	51,13b (7,39)	124 b (10)
Barbecho	9341,92b (789,91)	7,46d (0,021)	2996,87a (112,62)	15,9c (8,2)	599,858a (225,63)	117,07a (13,81)	85,00a (6,46)	27a (5)
Pasto	15110,20a (806,27)	7,73b (0,048)	289,12c (26,17)	52,20a (5,07)	806,70a (98,38)	80,04c (5,12)	26,92c (3,35)	65 b (14)
Cultivo	9198,43b (228,17)	7,62c (0,042)	1317,87b (137,02)	18,4c (2,7)	79,34b (6,33)	99,24b (6,33)	92,98a (1,04)	232 b (50)

Los valores mostrados son los promedios de 12 mediciones para cada condición y están expresados en base a peso de suelo seco en estufa (105 ºC, 24h). Los valores entre paréntesis corresponden a las desviaciones estándar, las letras minúsculas señalan diferencias significativas ($p \leq 0,01$)

Tabla III. Coeficientes de Correlación entre propiedades químicas y microbiológicas de los suelos

Al inicio del cultivo	CO	CE	qCO_2	Respiración
CBm	0,83	-0,57	-0,32	0,93
Respiración	0,84	-0,75	0,04	
Al final del cultivo	**CO**	**CE**	**qCO_2**	**Respiración**
CBm	0,74	-0,17	0,69	0,71
Respiración	0,77	-0,75	0,83	

Al inicio del ciclo de cultivo**,** el suelo bajo condición natural presenta más alto qCO_2, lo que refleja un mayor esfuerzo de las comunidades microbianas presentes en este suelo para la sobrevivencia, lo que también guarda estrecha relación con una más baja concentración de CO y de nutrientes (P y K). El suelo bajo cultivo presenta qCO_2 más bajo que el de condición natural lo que pudiera sugerir una condición más privilegiada de las poblaciones microbianas en este suelo, no obstante, presenta las más bajas biomasa microbiana y respiración basal lo que pudiera ser el resultado de un efecto negativo del uso de fungicidas y herbicidas. Al respecto (Tsiafouli et al, 2014) señalan que el manejo agrícola intensivo afecta significativamente la biodiversidad del suelo y sus grupos funcionales. Sin embargo, existen tipos de uso y manejos del suelo que pueden contribuir a mantener la biodiversidad del suelo y sus funciones, como es el caso del uso de residuos de cultivo y abonos verdes, abonos orgánicos compostados, sistemas de labranza reducida, rotación de cultivos y descanso del suelo, menos uso de plaguicidas, entre otros. En este sentido, el suelo bajo pasto presentó mejores valores de

respiración basal, CO y carbono microbiano, indicando que las poblaciones microbianas se favorecen de este manejo menos perturbador.

Al final del ciclo de cultivo, la salinidad del suelo medida por su CE disminuye en todos los suelos a consecuencia de las precipitaciones que se registran en el periodo entre las fechas de muestreo. Como consecuencia, la biomasa microbiana aumenta en todos los suelos, excepto en el suelo bajo cultivo de cebolla, en el cual ocurre una disminución de biomasa microbiana, en comparación al inicio, acompañada de un incremento en la respiración basal, lo que se traduce en un mayor qCO_2, lo que parece evidenciar un efecto negativo del uso intensivo de agroquímicos sobre las propiedades biológicas de este suelo. Resultados similares fueron encontrados por Mogollón et al. (2015) en suelos de la región semi-árida de Falcón en Venezuela, en los cuales el sistema de monocultivo de tomate presento los valores más altos de CE y qCO_2, y los más bajos de biomasa microbiana, en comparación con los sistemas cultivo en rotación tomate-pimentón-cebolla y en condición de vegetación natural.

CONCLUSIONES

Las propiedades microbiológicas del suelo resultaron ser indicadores sensibles para evaluar los efectos producidos por el uso agrícola en suelos de clima semi-árido. El sistema de cultivo convencional mostró los mayores problemas de degradación biológica del suelo posiblemente debido al uso intensivo de agroquímicos.

REFERENCIAS

Aciego Pietri, J. C. and Brookes, P. C. Nitrogen mineralization along a pH gradient of a silty-loam UK soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 797-802. (2008).

Aciego Pietri J.C, Brookes P.C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biology and Biochemistry* 41,1396-1405. (2009).

Casanova E. Introducción a la Ciencia del Suelo. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV). Segunda edición, Caracas, Venezuela. 395 P. (2005).

Fundación para el desarrollo de la región centro occidental de Venezuela (FUDECO). Dossier Estado Lara. Barquisimeto Estado, Lara. 21-22 pp. (2004).

Heanes, D. Determination of total organic-C in soil by and improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure: Soil Science Plant Analysis. (1984).

Jackson, M. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega Barcelona.662p. (1964).

Jenkinson, D.S. The determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Wilson, J.R. (Ed.), Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems. CAB International, Wallingford, pp. 368–386. (1988).

Mendoza, B.; Florentino, A.; Hernández-Hernández, R.; Aciego, J.; Torres, D. y Vera, E. Atributos biológicos de dos suelos de Quibor con aplicación de abono orgánico y soluciones salinas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 4(3): 409-421. (2012).

Mogollón, J.; Vera, M. y Martínez, A. Efecto de los plaguicidas sobre la calidad química y biológica del suelo en sistemas de producción de hortalizas del semiárido venezolano. *Revista QuímicaViva,* 14(1). (2015).

Pérez, J. R.; Schargel, R.; Gómez, J. M. y Ohep, C. Estudio semidetallado de suelos a nivel de series del valle de Quíbor. Barquisimeto: Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor. Venezuela. 78 p. (1995).

Rietz, D. N. and Haynes, R. J. Effects of irrigation induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 35:845-854. (2003).

Sistema hidráulico Yacambú- Quibor C. A. (SHYQCA). Estudio de uso actual de la tierra en el Valle de Quibor. Gerencia de Desarrollo y Conservación. Barquisimeto. Venezuela. 80 p (2003).

Tinsley, J., Taylor, T.J., Moore, J.H. The determination of carbon dioxide derived from carbonates in agricultural and biological materials. *Analyst* 76, 300–310. (1951).

Tripathi, S. S.; Kumari, A.; Chakraborty, A.; Gupta, K.; Chakrabarti, L. and Bandyapadhyay, B. K. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biol. Fert. Soils*. 42: 273-277. (2006).

Torres,D.; Alvarez, J.; Contreras, J.; Henriquez, M.; Hernández, W.; Torres, J. y Mogollón, J. Identificación de potencialidades y limitaciones de suelos agrícolas del estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 29(3): 207- 218. (2017).

Tsiafouli, M.; Thebaut, E., Sgardelis, S., De Ruiter, P., Van Der Putten, W.; Birkhofer, K.; Hemerik, l. , De Vries, F.; Bardgett, R.; Brady, M.; Bjornlund, L.; Jørgensen, H.; Christensen, S.; D' Hertefeldt, T.: Hotes, S.; Gera Hol, W.; Frouz, J.; Liiri, M.; Mortimer, S.; Setälä, H.; Tzanopoulos, J.; Uteseny, K.; Pizl, V.; Stary, J.; Wolters, V. and Ina Hedlund, K.. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 973-985. (2014).

Vance, E. D.; Brookes, P. C. and Jenkinson, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*. 19:703-707. (1987).

SENSORAMIENTO REMOTO APLICADO A LA EVALUACIÓN DE CAMBIOS AMBIENTALES EN CORDONES LITORALES ASOCIADOS AL HUMEDAL DE LA BAHÍA SAMBOROMBÓN

Ali Santoro V.[a], Borzi G.[b,c], Tanjal C.[b,c] y Carol E.[b,c]

[a]*Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, UNSAM Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, FCNyM Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Centro de Investigaciones Geológicas, CIG, CONICET - UNLP, ARGENTINA*

e-mail: valisantoro@unsam.edu.ar

RESUMEN

El humedal de Bahía Samborombón localizado al este de la provincia de Buenos Aires constituye un sitio Ramsar desde 1997. En el mismo se agrupan sistemas de paisajes asociados a marismas activas, cordones litorales y antiguas planicies de marea. Dentro de estos los cordones litorales compuestos por conchillas y arenas, sustentan a relictos de bosques nativos compuestos principalmente por Celtis tala. Además, los cordones albergan lentes de agua dulce las cuales constituyen el principal recurso hídrico de la región. El objetivo del trabajo fue realizar un análisis multitemporal mediante sensoramiento remoto utilizando herramientas de libre acceso y de rápido procesamiento con el fin de evaluar los cambios en las características ambientales que ocurrieron en el humedal producto de la actividad minera y que afectaron a los bosques nativos y recursos hídricos. Para esto a partir del modelo digital del terreno TANDEM y las cartas topográficas de más de 40 años de antigüedad se reconocieron las áreas de cordones litorales. Posteriormente se analizaron series temporales de imágenes satelitales para identificar el avance temporal de la actividad minera y se realizaron relevamientos de campo a fin de reconocer cordones litorales donde se preserva el bosque nativo de talas, la presencia de bosques alóctonos, canteras y áreas desprovistas de arbolado. Posteriormente mediante la utilización de la herramienta Google Earth Engine se procedió a la obtención y análisis de firmas espectrales de los sitios observados a campo. Durante los relevamientos también se efectuaron mediciones de la salinidad del agua y profundidad de niveles freáticos en las lentes de agua dulce. Los resultados obtenidos permitieron evaluar los cambios en las características ambientales que ha producido la actividad minera en los últimos 40 años los cuales han reducido considerablemente las áreas de bosques nativos, así como también ha afectado a los recursos hídricos de la región.

Palabras Clave: Sensores remotos, Google Earth Engine, Bosques nativos, Recursos hídricos.

INTRODUCCIÓN

El humedal de Bahía Samborombón localizado al este de la provincia de Buenos Aires constituye un sitio Ramsar desde 1997. En este sector se agrupan sistemas de paisajes asociados a marismas activas, antiguas planicies de marea y cordones litorales. Los cordones litorales poseen una orientación subparalela a la línea de costa y se componen de conchillas y arenas donde se desarrollan suelos bien drenados que sustentan al bosque nativo de tala que agrupa especies de *Celtis tala*, *Scutia buxifolia*, *Sambucus australis*,

Schinus longifolius y *Jodina rhombifolia*, entre otras. Pese a ser uno de los únicos bosques nativos de la provincia, ha evidenciado un importante retroceso durante el siglo XX, inicialmente por su uso como leña y posteriormente a la explotación minera de conchilla (Parodi, 1940; Tanjal et al., 2017; Elizalde, 2020). La problemática del retroceso de este bosque nativo radica, no sólo en que se ven afectadas las especies autóctonas que dependen de él, sino también en que no existe una recuperación del mismo luego de la explotación minera (Arturi y Goya, 2004). Otra problemática, la constituye la afectación del recurso hídrico ya que en los cordones litorales se alojan lentes de agua dulce, las cuales son el principal recurso hídrico para consumo humano de la región (Sala et al., 1978; Carol, 2015). Se destaca que el análisis de la pérdida de este bosque ha sido abordado desde distintas disciplinas, observando que la utilización de herramientas de teledetección es de gran importancia para estos estudios. Pese a esto, la identificación, clasificación y cuantificación, son tareas que pueden demandar mucho tiempo, observando que las series temporales analizadas se limitan sólo a algunos estadios puntuales (Cellone et al., 2016; Borzi, 2018; Elizalde, 2020). En este sentido, es necesario utilizar herramientas capaces de evaluar cambios ambientales ocurridos en los cordones litorales del humedal. Por esta razón, el objetivo del trabajo fue realizar un análisis multitemporal mediante sensoramiento remoto utilizando herramientas de libre acceso y de rápido procesamiento con el fin de evaluar cambios en las características ambientales que ocurrieron en el humedal debido a la actividad minera que afectaron a los bosques nativos y recursos hídricos. Google Earth Engine es una plataforma basada en la nube que, a través de algoritmos, procesa de manera rápida gran cantidad de información geoespacial. Es decir, se utilizan las capacidades computacionales de Google para abordar diversos problemas socioambientales de alto impacto como la deforestación. La plataforma cuenta con un amplio catálogo de datos que se encuentran públicamente disponibles. En el catálogo podemos encontrar la colección histórica de imágenes de Landsat, Setinel, Modis, etc. (Gorelick et al., 2017).

MÉTODOLOGIA

Inicialmente se utilizaron cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de más de 40 años de antigüedad juntamente con un modelo digital del terreno (DEM) TanDEM (EOC Geoservice, 2019), donde se reconocieron las áreas de cordones litorales. Seguidamente, se realizaron relevamientos de campo a fin de reconocer cordones litorales donde se preserva el bosque nativo de talas, la presencia de bosques alóctonos, canteras y áreas desprovistas de arbolado. Durante el trabajo de campo se procedió a la medición de salinidad del agua y profundidad de niveles freáticos en las lentes de agua dulce alojada en los cordones litorales.

Luego de identificar los distintos sectores del área de estudio, se procedió a la extracción y análisis de las firmas espectrales de las principales coberturas utilizando una imagen de Landsat 8 OLI del verano del 2020. Realizada esta tarea se continuó con el análisis de series multitemporales de imágenes satelitales Landsat para identificar el avance temporal de la actividad minera. Este análisis se realizó mediante la utilización de la herramienta Google Earth Engine, a través de la obtención y análisis de firmas temporales de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para los sitios observados en campo. Para analizar la serie temporal se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y 8 OLI calibradas a reflectancia en superficie abarcando un período de 34 años, desde 1986 hasta el 2020. Inicialmente fueron seleccionadas imágenes de verano y de invierno con un porcentaje de cobertura de nubes menor al 10 % conformando mapas de NDVI que condensan el

periodo de años abarcado y se obtuvo el valor promedio de NDVI para los meses de verano e invierno. Por otro lado, se realizaron gráficos bivariados en los cuales se analizó la firma temporal de NDVI para cada una de las áreas de detalle relevadas en campo. Este análisis fue complementado con la visualización de imágenes satelitales Landsat y con fotografías aéreas de la década del 80'.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el área de humedal las unidades del paisaje asociadas a la antigua llanura de marea y a la marisma constituyen zonas deprimidas donde las cotas rara vez superan los 3 msnm. Por su parte, la unidad del paisaje correspondiente a los cordones litorales constituye una geoforma positiva cuyas cotas pueden alcanzar los 6 msnm, permitiendo esta característica su rápida identificación a partir del análisis de las cartas topográficas y el modelo digital del terreno (Fig. 1). Los cordones litorales se caracterizan también por presentar suelos bien drenados y agua subterránea de baja salinidad (Fig. 1) característica también resalta en contraste con las otras unidades del paisaje del humedal donde domina el agua salina (Carol, 2015).

Estas características distintivas determinan ambientalmente que los cordones litorales adquieren relevancia por alojar lentes de agua dulce y por ser la unidad del paisaje del humedal que conforma el sustrato del monte nativo de talas. No obstante, el análisis temporal de imágenes satelitales evidencia que este sustrato ha sido paulatinamente degrado por la explotación minera, la cual extrae el bosque nativo decapitando los suelos en que estos se desarrollan. Posterior a la explotación, el paisaje de los cordones litorales se presenta como canteras donde aflora el nivel freático, o como zonas planas en donde se siembran pasturas o queda el material de descarte desprovisto de vegetación. Esto ha ocasionado una pérdida de la morfología positiva de los cordones litorales. De esta manera zonas de cordones litorales delimitados a partir de las cartas topográficas hace 40 años (polígono con rayas indicado en la Fig. 1) se observan como zonas deprimidas en los DEM actuales.

La pérdida del bosque nativo por las explotaciones mineras es evidenciada en el análisis comparativo de imágenes satelitales seriadas desde el año 1986, fotografías aéreas de la década del 80 y mapeos en las cartas topográficas confeccionadas en la década de 1960. En este sentido, se destaca que el bosque nativo de talas se encuentra en la actualidad restringido sólo a algunos sectores. Durante los relevamientos de campo, escasas estancias presentaban el monte nativo de talas, siendo el más destacable el de la estancia La Petrona (Fig. 1). Asimismo, dicha estancia posee, como en la mayoría de las estancias del área de estudio, zonas de cordones litorales desprovistas de arbolado y sectores dedicados a la plantación de especies alóctonas. Esta situación se ve agravada debido a que donde se desarrolla el monte de tala, también se reconoce la presencia de especies exóticas, reduciendo aún más al monte nativo.

En base al análisis precedente y al trabajo de campo, se procedió a obtener las firmas espectrales de las distintas áreas observadas mediante imágenes Landsat, obteniendo así las firmas espectrales del monte de talas, monte invadido de especies exóticas, cordón litoral con árboles alóctonos como eucalipto, cordón litoral previamente explotado y cubierto con pastizal, y cordón conchil explotado dejando una cantera con agua (Fig. 2). A partir de estas se observa que bien las coberturas vegetales poseen el patrón característico de la vegetación, los picos de la Banda 5 poseen distintas intensidades en cada cobertura. Por su parte, la cantera ocupada por agua registra un patrón característico del agua.

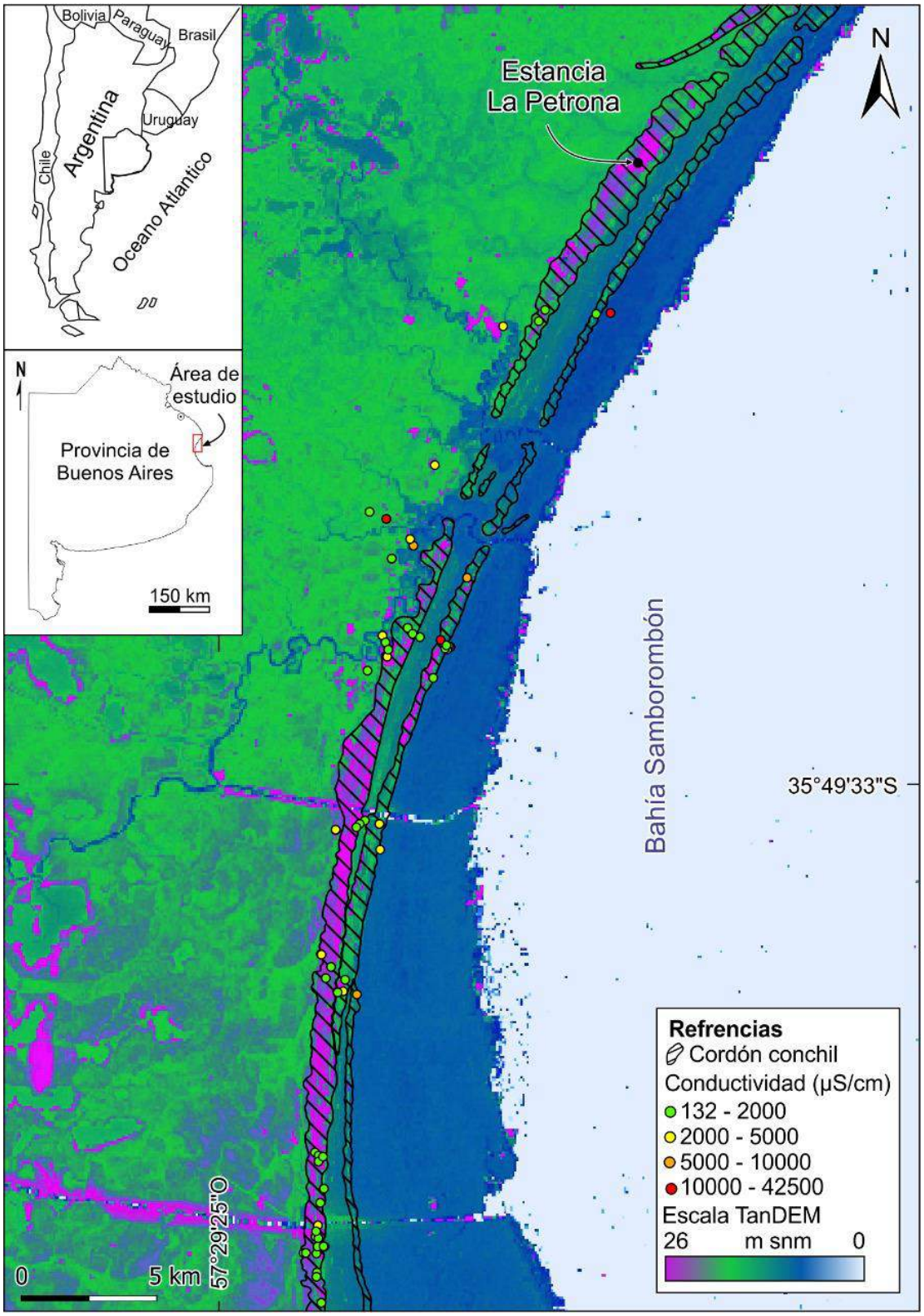


Figura 1. Mediciones de conductividad del acuífero freático y cordones de conchilla mapeados. Base de la imagen TanDEM.

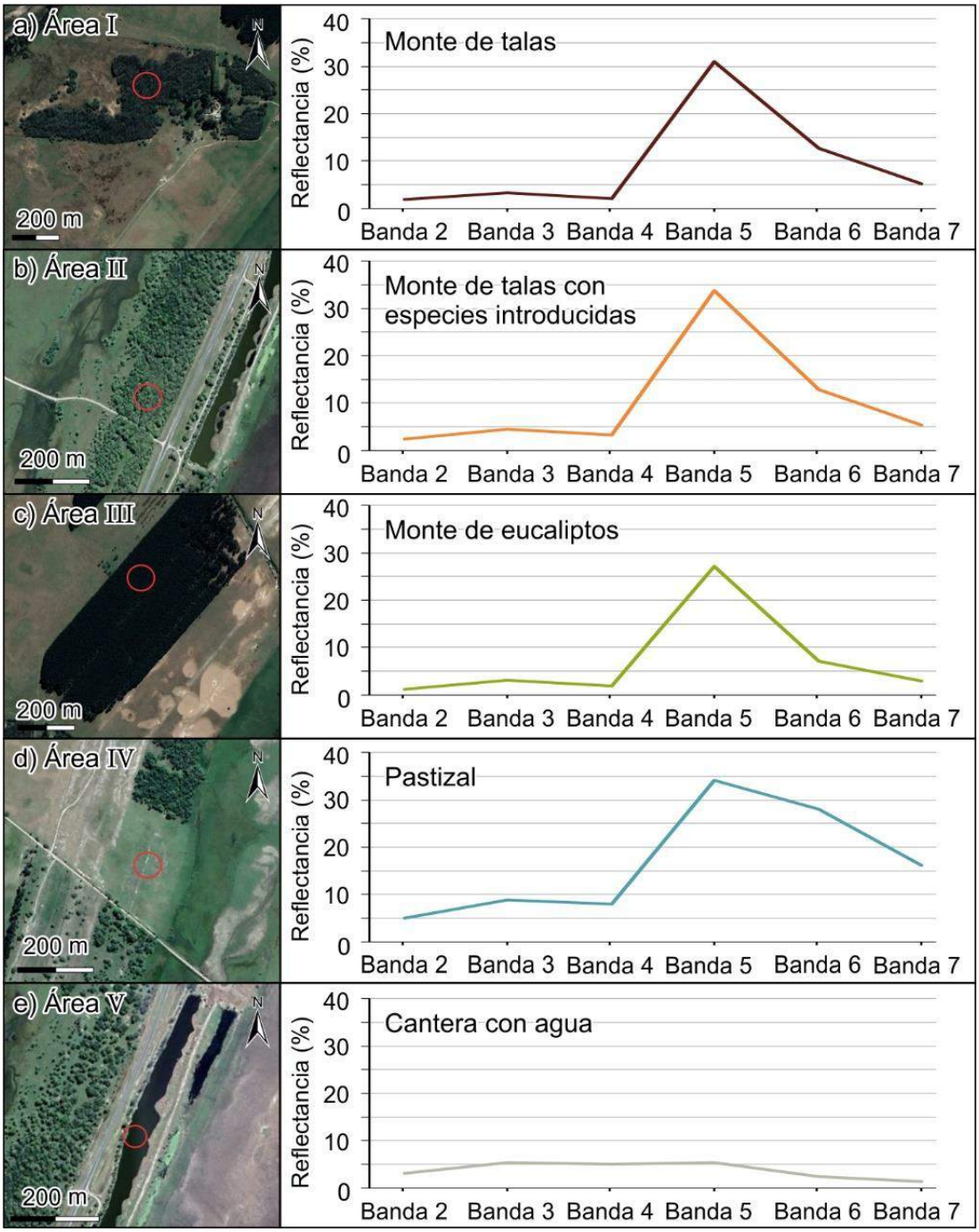


Figura 2. Firmas espectrales de distintas coberturas sobre los cordones litorales obtenidas mediante la serie Landsat 8. **a.** monte de talas. **b.** monte de talas invadido. **c.** monte de eucalipto. **d.** pastizal. **e.** cantera con presencia de agua.

Se procesaron un total de 659 imágenes Landsat con una cobertura de nubes menor o igual al 10%. La variación temporal en los valores de NDVI fue compilada en 2 mapas, los que concentran la información de los últimos 36 años. Dichos mapas se corresponden con imágenes de verano e invierno (Fig. 3 a y b respectivamente). En el mapa de verano se distinguen de manera restringida áreas con montes nativos de talas (coloración bordo

en la Fig. 3a) y montes de talas y especies arbóreas introducidas (coloración naranja con escasos pixeles bordo en la Fig. 3a). Por otro lado, en el mapa de invierno pueden identificarse zonas en donde han sido introducidos montes perennes como eucaliptos (coloración naranja en Fig. 3 b). La cobertura de pastizales fue más notoria en verano, y se encontraron en una posición topográfica relativa más baja relacionado a los antiguos canales de marea (coloración naranja en la Fig. 3a) y en la planicie de marea que está topográficamente más elevada (coloración verde en la Fig. 3a). Respecto a la identificación de pastizales en el cordón conchil, se observó que la cobertura del sustrato fue variable, con sectores donde hay amplio desarrollo del pastizal (coloración celeste en la Fig. 3a) y sectores con sustrato desnudo o con escasa cobertura vegetal (coloración violeta en la Fig. 3a). Por último, la presencia de agua fue indiscutible por el bajo valor de NDVI, rasgo que caracteriza a las canteras principalmente en verano (coloración gris en Fig. 3 a).

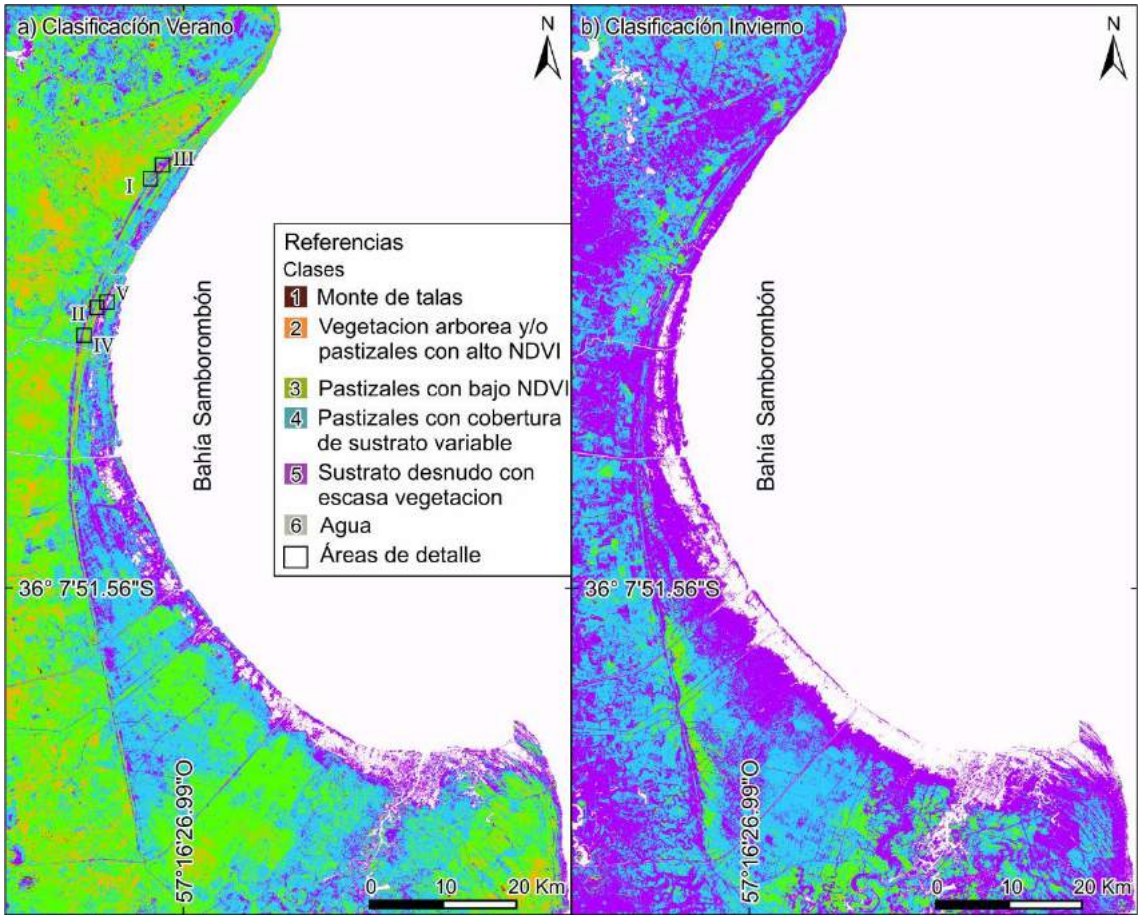


Figura 3. Análisis multitemporal de NDVI en el área de estudio obtenido mediante la serie Landsat, en recuadros negros se pueden observar las áreas de detalle analizadas. **a.** Verano. **b.** Invierno. Clases: **1.** Monte nativos de talas (Bordo). **2.** Monte de tala con especies arbóreas introducidas y/o perennes y pastizales ubicados en canales de marea (Naranja). **3.** Pastizales con bajo NDVI ubicados en la planicie de marea (Verde). **4.** Sustrato con cobertura de pastizales variable (Celeste). **5.** Sustrato desnudo con escasa vegetación (Violeta). **6.** Cuerpos de agua (Gris).

Por su parte, el análisis multitemporal evidencio distintos comportamientos respecto a las coberturas reconocidas (Fig. 3 y Fig. 4). En este sentido, el monte de talas (ver área I en

Fig. 3 y Fig. 4) posee una variación en el NDVI, la cual se corresponde con la estacionalidad y la pérdida de hojas debido a sus características caducifolias (Fig. 4a). Por otra parte, los montes de tala invadidos por especies exóticas (ver área II en Fig. 3 y Fig. 4) presentan un patrón similar al del monte de talas ya que también son arboles caducifolios (Fig. 4b), sin embargo, pueden diferenciarse por las firmas espectrales apoyadas en el relevamiento de campo. En los bosques implantados de eucalipto (ver área III en Fig. 3 y Fig. 4), si bien se observa una estacionalidad como en el monte de tala, esta es menos notoria dado al carácter perenne que posee el eucalipto. Pese a esto, la tendencia observada en el NDVI de estos montes es inversa a la de los montes de tala, mostrando mayor actividad durante los meses más fríos (Fig. 4c). Además, se observa que alrededor de 1997 el NDVI de ese monte de eucalipto crece notablemente. Mediante el análisis de fotografías de la década de 1980, se observa que inicialmente era un área de pastizales y, años más tarde fue implantado el monte dando como resultado una tendencia creciente del NDVI en la serie multitemporal.

Respecto al área IV (Fig. 3 y Fig. 4), el análisis evidencio un patrón similar al monte de talas hasta el año 2007 (Fig. 4d). Posteriormente, el NDVI disminuye abruptamente a valores que indican la falta de vegetación, situación que perdura hasta el 2011 aproximadamente. Luego, el NDVI se incrementa levemente, pero con un patrón diferente al del monte de talas. El análisis de la serie de imágenes satelitales permitió corroborar que anteriormente había un monte de talas, el cual fue extraído para la explotación de la conchilla subyacente. Finalmente, la cantera fue nivelada y actualmente el sitio posee el desarrollo de un pastizal.

Por último, en el área V (Fig. 3 y Fig. 4), primero se observa un patrón semejante al monte de tala, sin embargo, para el año 1999 los valores de NDVI se tornan negativos, demostrando falta de la cobertura vegetal inicial. Posteriormente, los valores oscilan a valores muy bajos, entre 0 y -0,2 aproximadamente. Estas variaciones según el análisis de imágenes satelitales y los relevamientos de campo efectuados, indican la remoción del monte de tala para la explotación de la conchilla. Después de 1999, la cantera generada fue ocupada por agua lo que conduce a valores de NDVI entre 0 y -1, mientras que el leve ascenso observado en estos se deba posiblemente a la presencia de algas las cuales fueron observadas en campo. En ambos casos (Fig. 4 d y e), puede observarse a partir del análisis temporal el cambio en los valores de NDVI que evidencia el momento en que el bosque nativo fue eliminado. Es importante resaltar que luego de la actividad minera no se ha observado en ninguna de las áreas estudiadas la recuperación del bosque nativo luego de la explotación del cordón litoral.

Respecto a los cambios asociadas a las lentes de agua dulce alojadas en los cordones litorales, si bien la salinidad del agua subterránea es baja tanto en los cordones litorales naturales como en los explotados, existe una modificación en la morfología de las lentes (Carol et al., 2015). Las mediciones de niveles freáticos evidencian que la disminución en la topografía luego de la explotación minera produce una somerización del nivel freático. Este cambio en el espesor de la zona no saturada, así como la decapitación de los suelos, podría ser el responsable de que no ocurra una regeneración del bosque nativo luego de la explotación minera del cordón litoral. Asimismo, trabajos antecedentes demostraron que en las zonas con canteras existe una eutrofización del agua dulce acumulada que afecta la calidad del recurso hídrico (Tanjal et al., 2019).

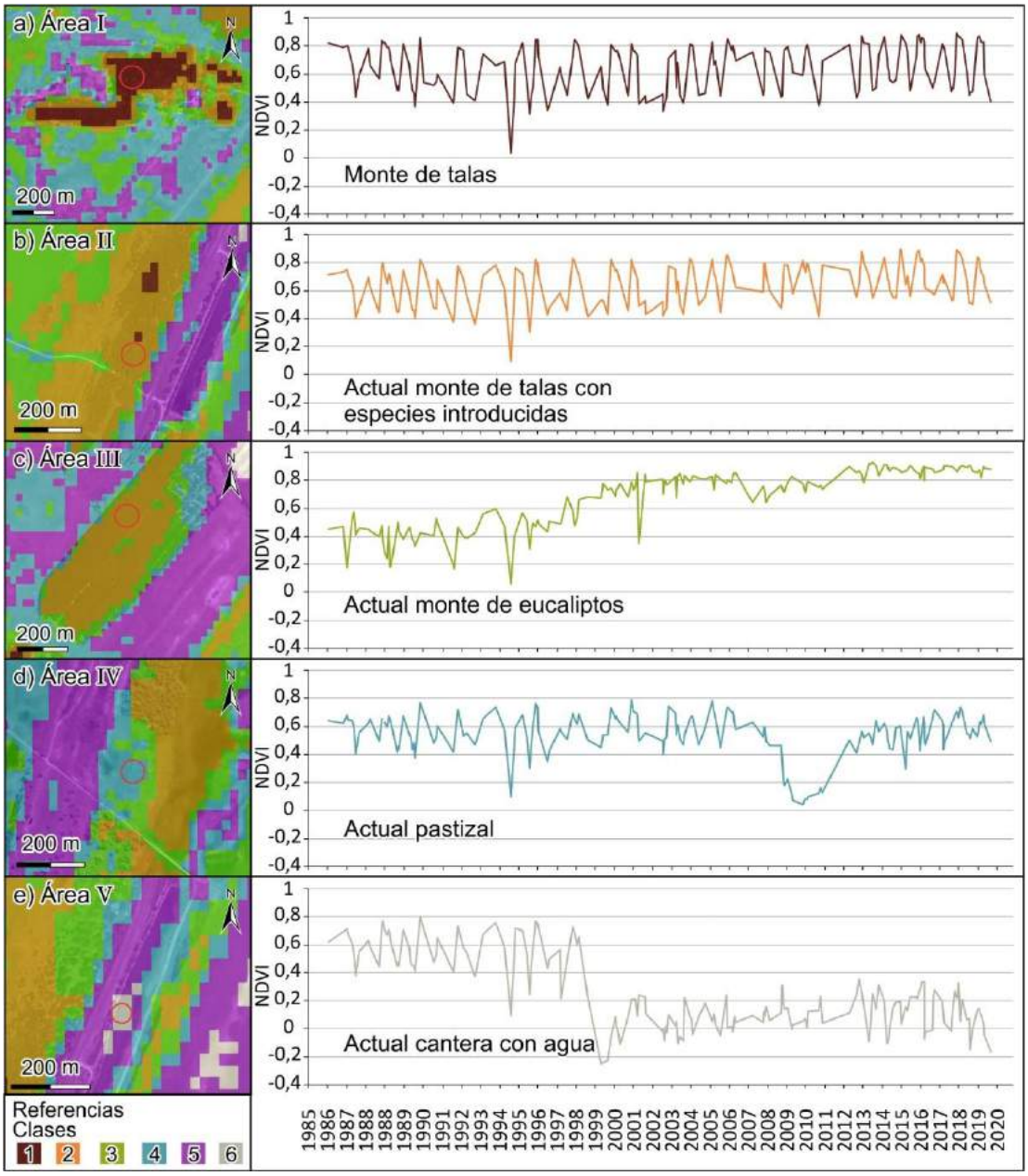


Figura 4. Análisis multitemporal del NDVI promedio en distintos cordones litorales obtenidos mediante la serie Landsat, las clases obtenidas fueron 1- monte de talas, 2- vegetación arbórea y/o pastizales con alto NDVI, 3- vegetación arbórea y/o pastizales con bajo NDVI, 4- pastizales, 5- sustrato desnudo con escasa vegetación y 6- agua. El círculo rojo indica el sector donde se realizó el análisis multitemporal de NDVI para cada área de detalle. **a.** monte de talas. **b.** monte de talas invadido. **c.** monte de eucalipto. **d.** cantera niveladas y crecimiento de pastizales. **e.** desarrollo de canteras ocupadas por agua.

CONCLUSIONES

La metodología generada permite identificar rápidamente los cambios ambientales que se han producido en los últimos 34 años en los cordones litorales asociados al humedal de Bahía Samborombón. El análisis multitemporal del NDVI y de las firmas espectrales en

las distintas áreas relevadas demostró cómo la actividad minera conduce a una disminución en los montes de tala, no sólo por la deforestación, sino también por la modificación que esta produce en el sustrato y agua subterránea. Asimismo, se pudo observar que en ninguna de las áreas estudiadas el monte de tala ha podido recuperarse luego de la explotación del cordón litoral.

Siendo los montes de tala del humedal de Bahía Samborombón uno de los últimos relictos de los bosques nativos de la región, la metodología propuesta en este trabajo constituye una herramienta para la generación de pautas de gestión y conservación de estos ambientes.

REFERENCIAS

Arturi, M. F., Goya, J. F. Estructura, dinámica y manejo de los talares del NE de Buenos Aires. Ecología y manejo de los bosques de Argentina, La Plata, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (2004).

Borzi, G. E. Influencia de la actividad antrópica en la geohidrología de la cuenca del río Samborombón. Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata. (2018).

Carol, E. Procesos geohidrológicos y geoquímicos que condicionan la composición del agua subterránea en el humedal de Bahía Samborombón. Anales de la Academia Nacional de Ciencias. Exactas, Físicas y Naturales, tomo 67, 26-40. (2015).

Carol E., García L., Borzi G. Hydrogeochemistry and sustainability of freshwater lenses in the Samborombón Bay wetland, Argentina. Journal of South American Earth Sciences 60: 21-30 (2015).

Carol, E., Mas Pla, J., Kruse, E. Interaction between continental and estuarine waters in the wetlands of the northern coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. *Applied Geochemistry* 34: 152 163 (2013).

Cellone F., Elizalde N., Tosi L., Carol E. Identificación y delimitación de lentes de agua subterránea dulce en la planicie costera del Río de la Plata, Punta Indio, Buenos Aires, Argentina. I Jornadas Internacionales y III Jornadas Nacionales de Ambiente (2016).

Elizalde, N. Modificaciones Antrópicas del Paisaje hidrológico ocurridas dese principios del siglo XX en un sector de la llanura costera del Río de La plata. Trabajo final de Licenciatura. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP (2020).

EOC, Geoservice. The Tandem-X 90m Digital Model. (2019). Recuperado de https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, *202*, 18-27 (2017).

Parodi, L. R. La distribución geográfica de: los talares en la Provincia de Buenos Aires. Darwiniana, 4(1), 33-56 (1940).

Sala, J. M.; González, N.; Hernández, M. A. Efectos de una barrera hidráulica natural en las aguas subterráneas del litoral de la Bahía de Samborombón. Obra del Centenario del Museo de La Plata, Tomo IV 153-166. La Plata. (1978).

Tanjal C., Carol E., Richiano S., Santucci L. Freshwater lenses as ecological and population sustenance, case study in the coastal wetland of Samborombón Bay (Argentina). Marine Pollution Bulletin 122, 426 – 431 (2017).

Tanjal C., González, J., Galliari, M. J., Melendi, E. Eutrofización en agua superficial en canteras abandonadas, un caso de estudio en Bahía Samborombón. 7° Congreso de Ciencias Ambientales - COPIME (2019).

GEOLOGÍA DEL CONO ALUVIAL DE LA CIUDAD DE CATAMARCA – ARGENTINA

Alvarez M. J.[a] *y* Eremchuk J. E.[a]

[a] *Departamento de Geología, FTyCA, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*

e-mail: majogeolog@hotmail.com

RESUMEN

El cono aluvial de la ciudad de Catamarca se encuentra ubicado en el sector noroeste de la depresión tectónica denominada Valle Central, formado, a partir de los flujos de la cuenca del río El Tala y como consecuencia de la elevación de las Sierras Ambato-Manchao con rumbo N-S producto de fallas regionales inversas de alto ángulo que se produjeron durante la orogenia andina siendo parte de la provincia geológica de Sierras Pampeanas Occidentales. Esta geoforma, que fue definida como F. Coneta por Nullo (1981) crea un cono aluvial a partir del quiebre de pendiente del rio El Tala-Ongoli. Esta unidad se compone de gravas gruesas, arenas y limos arenosos poco seleccionados. La mayoría de sus depósitos presentan clastos recubiertos por una fina pátina de carbonato de calcio indicando que el clima de depositación fue árido. Debajo de estos sedimentos están depósitos asignados al primer nivel de pie de monte, definido como Formación Concepcion (Fidalgo,1981). Representa restos de lo que fue un antiguo cono aluvial proveniente de la misma cuenca hidrográfica. Esta unidad está compuesta de gravas medias a gruesas con matriz arenosa, con presencia de termoclastia sinsedimentaria. Ambas unidades están, en inconformidad, por encima del Complejo Igneo – Metamórfico El Portezuelo (CMIEP) definido por Larrovere et al. (2009). El mismo está compuesto de migmatitas, gneises y esquistos con intrusiones de cuerpos ígneos, evidenciando un grado metamórfico medio-alto. El cono aluvial descripto como F. Coneta es "interceptado" en su parta distal por unidades sedimentarias denominadas Formación Paclin y Rio del Valle (Merea Llanos,1981) correspondientes al Holoceno tardío, formados por limos y arenas fluviales de diferentes granulometrías según el grado de selección que posean los sedimentos.
En base a las investigaciones realizadas sobre imágenes satelitales, controles de campo y cruce de información en gabinete se concluyó en la realización de un mapa de detalle sobre la zona de estudio, la determinación de relictos sobre elevados de la F. Concepcion al mismo nivel de la F. Coneta, al mismo tiempo los sedimentos gravosos de esta ultima presentan una alteración con una cubierta de pátina de carbonato de calcio en el mismo sentido que la variación de la generación de sus diferentes lóbulos de agradación, de tal manera que el Lóbulo inferior no presenta patina carbonosa. Comparando las alteraciones de las gravas de la F. Concepción con las de Coneta, se tiene una variabilidad paleo-climática relevante, en la primera unidad existieron condiciones climáticas con gran amplitud térmica, generando termoclastía, mientras que en la segunda unidad (F. Coneta-Lóbulo superior) las condicione paleo-climáticas fueron diferentes, dado que las gravas presentan una cubierta carbonosa propia un clima árido a semi-árido con elevada evaporación ambiental. Finalmente, el Lóbulo inferior, cuyas gravas no presenta alteración es consecuente con las condiciones climáticas actuales del valle central de Catamarca.

Palabras clave: Cono aluvial, termoclastía, alteración química, paleo-clima.

INTRODUCCIÓN

El cono aluvial en donde se encuentra la trama urbana de la ciudad de Catamarca corresponde a depósitos aluviales de la cuenca del río el Tala-Ongolí, la cual se desarrolla sobre las estibaciones orientales de las sierras de Ambato, ambiente de la provincia geológica de Sierras Pampeanas Noroccidentales, con la característica de ser grandes bloques de rumbo N-S divididos por depresiones elongadas (Figura 1).

Dicha cuenca posee un drenaje controlado por el sistema de fracturamiento, especialmente sus colectores principales, su pendiente regional es consecuente con la deformación del macizo serrano, producto de la orogénesis ándica, desde el Plioceno hasta la actualidad (Eremchuk, 2002). El acarreo de materiales de dicha cuenca ha sido depositado a la salida del macizo rocoso generando dos niveles de depósitos, los cuales se pueden reconocer por suposición en el relieve y donde se reconocen diferentes facies litológicas.

Las unidades geológicas reconocidas, corresponde al Complejo Metamórfico Ígneo El Portezuelo (Larrovere, 2009) cuyos afloramientos rocosos pertenecen al ciclo Famatiniano y forman parte del sistema serrano de las sierras de Ambato. Las Formaciones Concepción (Fidalgo, 1965) y Coneta (Nullo, 1981) unidades geológicas cuaternarias yacen en la parte baja de la cuenca del río El Tala-Ongolí y en donde se asienta más del 80% la ciudad de Catamarca (Figura 2). Se puso un interés particular en las características de campo, muestras de mano, las cuales presentan los depósitos estas dos últimas unidades y representan diferentes conos aluviales de la cuenca del río El Tala – Ongolí.

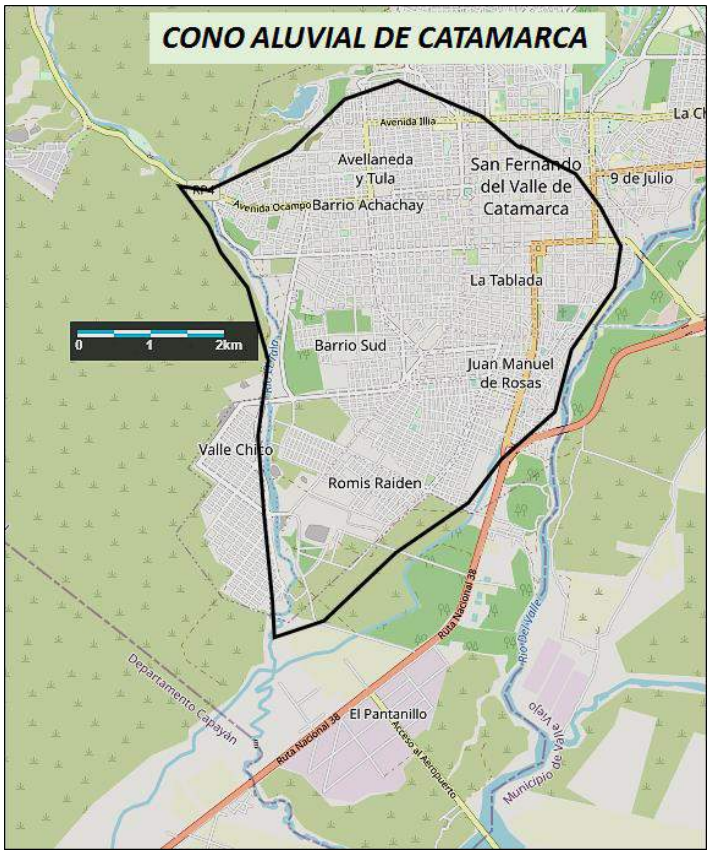


Figura 1: Croquis de ubicación relativa

MÉTODOLOGIA

La metodología de trabajo utilizada incluyó la revisión de antecedentes bibliográficos, la realización de una cartografía geológica, basada en imágenes satelitales y el relevamiento y control de campo. La información recopilada se trabajó luego en gabinete, pudiendo determinar la litología y tipificación de subunidades dentro de las Formaciones ya existentes y generando una cartografía final ajustada a las necesidades del presente trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describen las principales unidades geológicas aflorantes en el área de estudio, cuyos antecedentes más directos de la geología en el área de estudio corresponden a; González Bonorino (1978), Nullo (1981), Aceñolaza et al. (1977, 1983), Fidalgo (1965), Merea Llanos (1981), Eremchuk (2002) y Larrobere (2009), estos aportes se tuvieron en consideración como base para la cartografía elaborada (Figura 2).

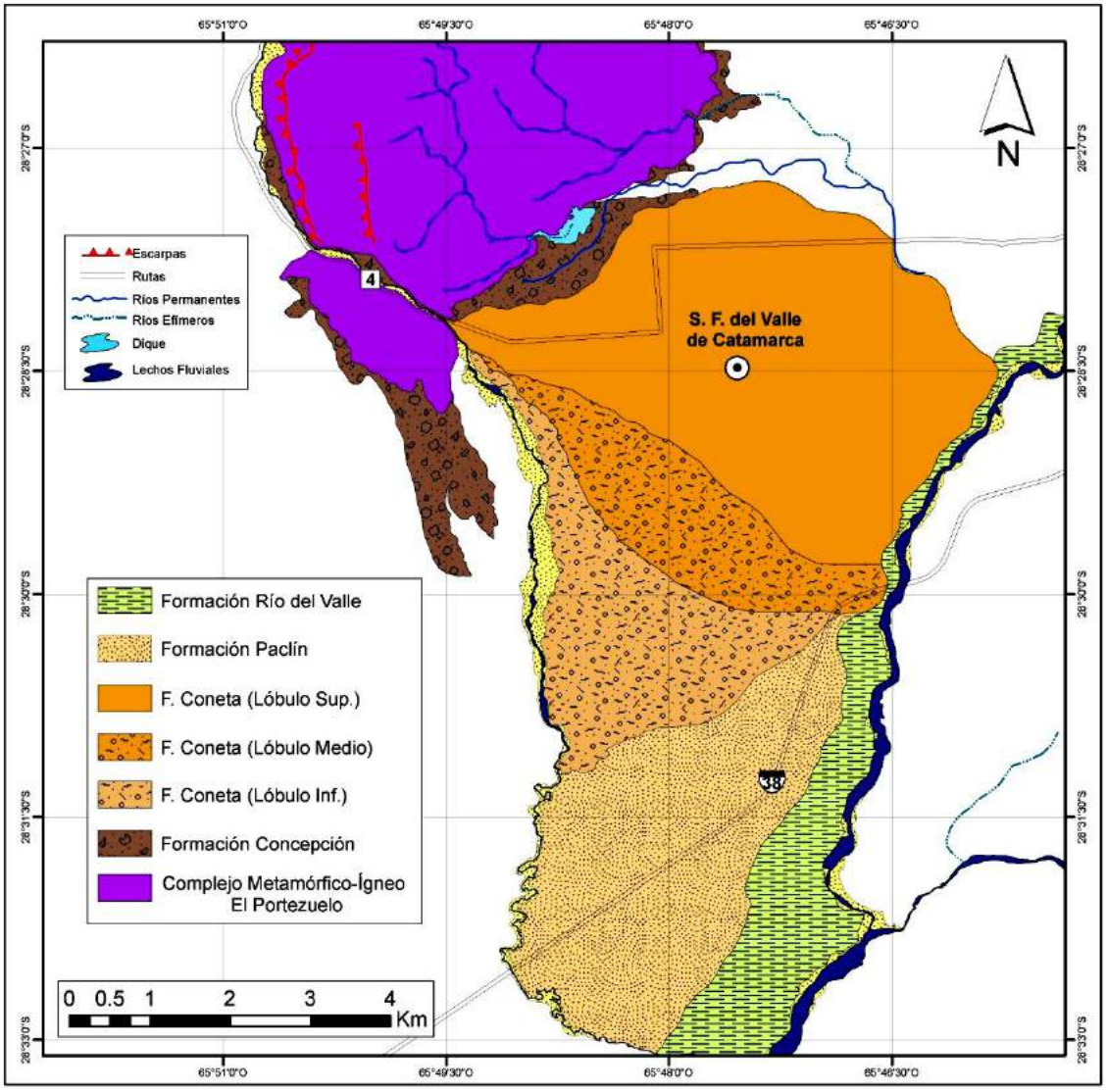


Figura 2. Carta geológica del cono aluvial de Catamarca

Complejo Metamórfico Ígneo El Portezuelo

Esta unidad fue definida por Aceñolaza y Toselli (1977), Aceñolaza et al. (1983) en el borde oriental de la sierra de Ancasti a nivel de Formación, extendiendo su denominación hasta nuestra zona de trabajo. González Bonorino (1978) las reconoce como "Esquistos inyectados y migmatitas" y Nullo (1981) como Formación Los Divisaderos, porque incluye en ella pegmatitas y cuerpos lepto o postectónicos de composición granítica. Los cuerpos pegmatíticos están presentes en el área de estudio, aflorando sobre la quebrada El Tala.

Finalmente, Larrovere (2009) agrupa a las rocas de nuestra área de trabajo (inicialmente como F. El Portezuelo) y rocas de la Formación Ancasti bajo la denominación de complejo metamórfico ígneo El Portezuelo (CMIEP) de grado medio-alto asignadas al Cámbrico Superior - Ordovícico Inferior-Medio, correspondiente al ciclo Famatiniano.

En nuestro sector de estudio, merece destacar los afloramientos de esta unidad, sobre la ruta n°4 y en la Av. J. Pablo II que lleva al Jumeal, en el paraje de Wika, cuyos cortes o taludes de las vías de comunicación permiten observar la compleja deformación mesoscópica del CMIEP perteneciente al ciclo Famatiniano (Figura 3).

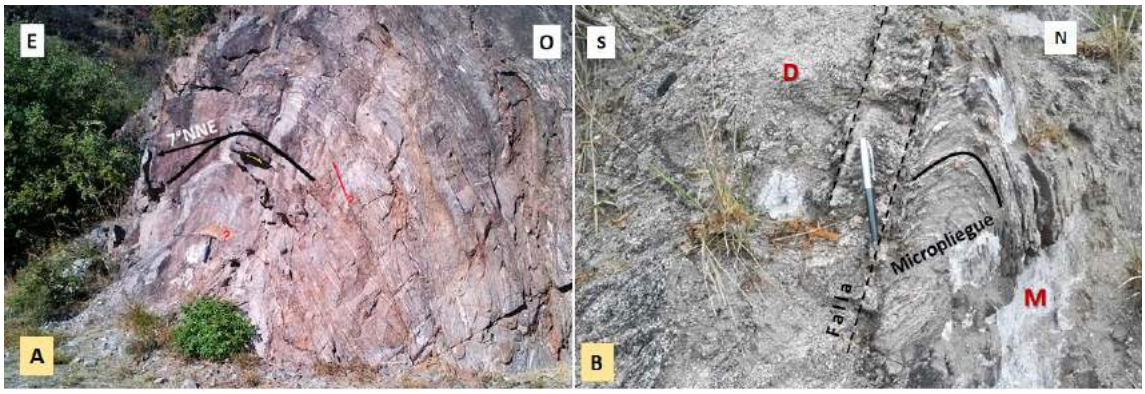


Figura 3: Afloramientos del CMIEP que muestran la deformación de fases tectónicas del ciclo Famatiniano. Foto A, pliegues mesoscópicos en la quebrada El Tala. Foto B, contacto tectónico de Diatexitas (D) con Metatexitas (M) microplegadas.

Formación Concepción

Fidalgo (1965) propone dicha denominación y caracteriza por primera vez a los depósitos fanglomerádicos del primer nivel de piedemonte del Valle de Catamarca como una unidad geológica. Luego Nullo (1981) y Merea Llanos (1981) incorporan dicha denominación a sus respectivos estudios con aportes de descripciones más detalladas y análisis mineralógicos de la fracción fina de estos depósitos, finalmente Blasco et al. (1994) extienden cartográficamente esta unidad a los valles intramontanos de la sierra de Ambato y depresiones tectónicas del Río del Valle y del río Paclín.

Los afloramientos de esta unidad en el área de trabajo pueden observarse en mapa geológico de la Figura 2, aquellos depósitos relacionados a la cuenca del río El Tala-Ongolí corresponden a relictos sobre elevados por tectónica de un antiguo cono aluvial.

En el paraje de Wika, de la Av. J. Pablo II, estos materiales yacen en discordancia sobre el CMIEP, la característica principal que presenta el corte son bancos de gravas fluviales intercalados con lentes de gravas cenoglomerádicas, tipo debris-flow. La composición litológica de las gravas, predominan las metamorfitas obladas y subredondeadas, cuyos tamaños varían entre gravas gruesas a medianas, la presencia de

rodados de mayor magnitud es escasos y no superan los 50 cm, esto presupone que dichos afloramientos corresponderían a tramos medios del antiguo cono aluvial.
Las gravas de la F. Concepción son fáciles de reconocer en el campo por ser una unidad morfo-estratigráfica sobre elevada conformada por un material litológico que presenta un importante grado de alteración por fenómenos de termoclastía, lo que implicaría un clima árido o semi-árido con gran amplitud térmica al momento de su depositación (Figura 4)

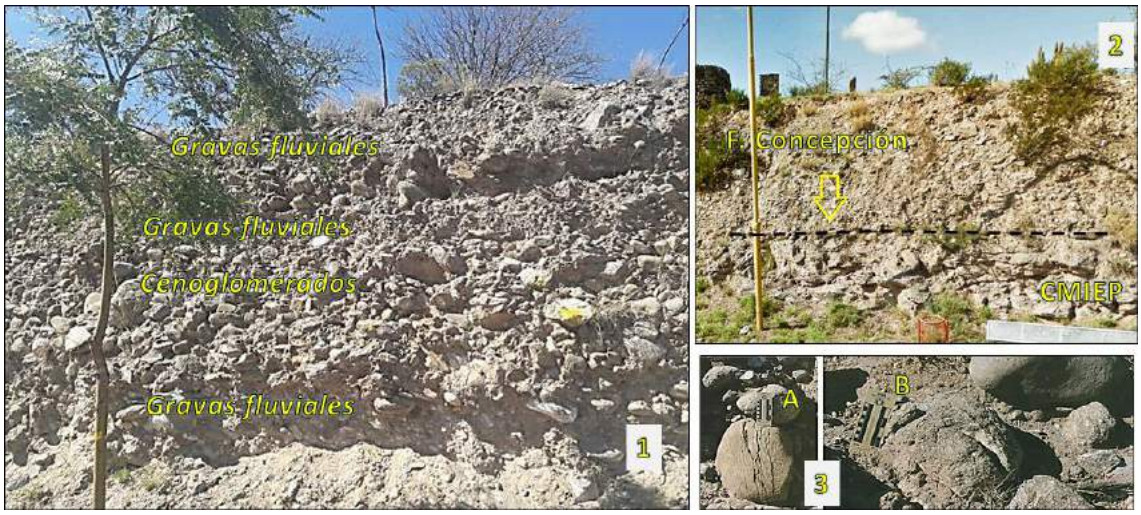


Figura 4: en la Foto 1, pueden observarse la alternancia litológica. En la Foto 2, se muestra la discordancia entre el CMIEP y la F. Concepción. En la Foto 3 corresponden a ejemplos de la alteración (termoclastía) de rodados de filitas (A) y de granitoides (B).
La edad de estos depósitos fue asignados al Pleistoceno s. l. por Nullo (1981), criterio mantenido por Blasco et al. (1994), por encima de los sedimentos rojos y pardos rojizos de la F. Sancas (Blasco et al 1994) asignadas al Plioceno-Pleistoceno.

Formación Coneta

Se debe a Nullo (1981) el nombre de esta unidad que corresponde a geoformas del segundo nivel de piedemonte y parte de la unidad que Fidalgo (1966) denominó "Gravas y Limos de Huillapima", Merea Llanos (1981) también restringe esta denominación al segundo nivel pedemontano, igualmente Blasco et al. (1994).
La interpretación de Fidalgo (1966) se basa en la distribución espacial que posee el cono aluvial de Huillapima, cuya geoforma es la de mayor superficie en el Valle de Catamarca, le sigue el cono aluvial generada por el río El Tala – Ongolí, en nuestra zona de estudio. Ambas unidades, en su parte distal se interdigita con sedimentos limos eólicos, asignados a la F. Paclín (Merea Llanos 1981).
La F. Coneta, desde el punto de vista morfo-estratigráfico, corresponde a un cono aluvial con migración de sus depósitos lobulares en forma lateral, esta interpretación es posible observarla por las características litológicas observadas en el campo de cada uno de ellos y por la interpretación de fotos aéreas e imágenes satelitales que muestran la dinámica fluvial de cada uno de ellos (Figura 2)
Bajo estos conceptos se identificó tres unidades litológicas que conforman la F. Coneta definidas como, **Lóbulo superior**, (Figura 2) corresponde a los depósitos más antiguos y de mayor extensión de la geoforma cuyos derrames agradacionales se extienden hacia el NNE, los sedimentos dominantes de esta unidad corresponden a facies de gravas, en su mayoría de carácter fluvial, con presencia de patina de carbonato de calcio (Figura

5), lo que implica condiciones climáticas diferentes a los sedimentos correspondiente a la F. Concepción. La presencia de la pátina que cubre los rodados se han observado en afloramientos de hasta 12 m de espesor (Eremchuk 1997)

Lóbulo medio, es una franja en donde se puede encontrar facies gravas limpias sin la cubierta de carbonatica (Figura 2 y 6) cubriendo a las gravas y gravas arenosas con pátinas de carbonato de calcio.

Lóbulo inferior, esta unidad se extiende en el sector austral del cono aluvial de Catamarca (Figura 2 y 6) y está compuesta por sedimentos con dominio de gravas, gravas arenosas y la presencia de bloques que pueden alcanzar el metro.

Estos depósitos corresponden a la agradación semiactiva de la cuenca del río El Tala-Ongolí, la calidad del material, con ausencia de la pátina de carbonato de calcio, y su cercanía a la trama urbana ha llevado que en dicha zona se instalen las principales canteras de áridos, tanto húmedas (sobe el eje del río) como secas, estas últimas yacen sobre esta unidad (Figura 7)

La evidencia de la presencia o ausencia de pátinas de carbonato de calcio que cubren a las gravas de los diferentes lóbulos de la F. Coneta, implica variaciones climáticas sin-sedimentarias al momento de su depositación.

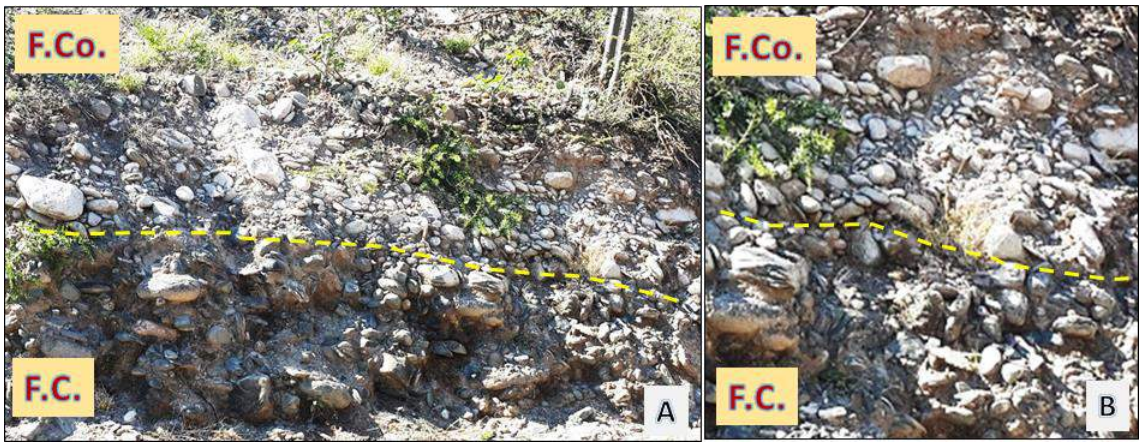


Figura 5. En la Foto A, se muestra el contacto entre las Formaciones Concepción (FC) y Coneta (FCo), Lóbulo superior. En la Foto B, pueden observarse la presencia de la pátina en las gravas del Lóbulo superior de la F. Coneta y la alteración de las gravas (termoclastía) de la F. Concepción.

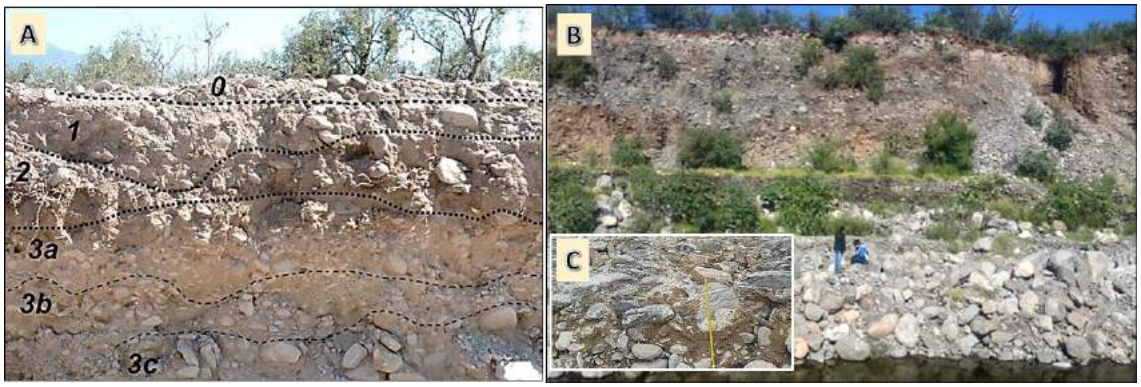


Figura 6. En la Foto A, se muestra un afloramiento del Lóbulo medio de la F. Coneta, en la cual los bancos 0, 1 y 2, corresponden a gravas sin pátina y los bancos con el n° 3 corresponden a material gravoso con pátina de carbonato de calcio. En la Foto B, se

puede observar el talud compuesto por material gravoso y gravo-arenoso del Lóbulo inferior que limita con el cauce del río El Tala-Ongolí. La Foto C, evidencia los rodados sin pátina del Lóbulo inferior.

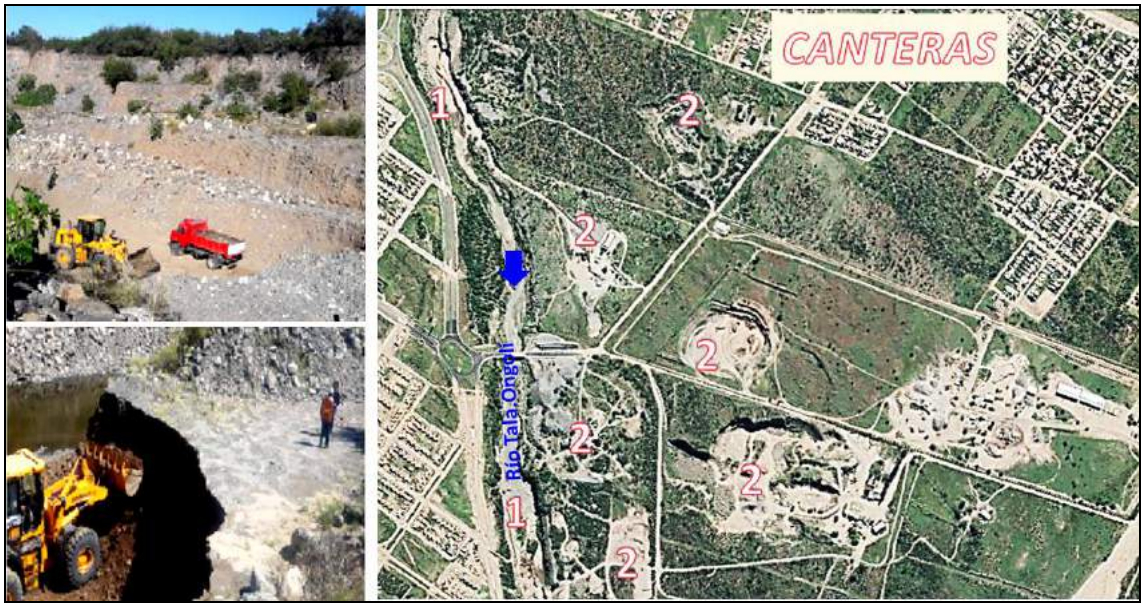


Figura 7. Fotos de la actividad extractiva de áridos y escena satelital de la ubicación de las canteras húmedas (1) y secas (2) que se ubican en el cauce del río El Tala-Ongolí y sobre el Lóbulo inferior de la F. Coneta.

Formación Paclín

Bajo esta denominación, Merea Llanos (1981) agrupa a los depósitos que Fidalgo (1966) llamó "Limos parecidos a Loess y a sedimentos limo - arenosos con intercalaciones de gravas finas. Nullo (1981) y Blasco et al. (1994) describen a esta unidad junto a otros depósitos de gran extensión areal en el Valle de Catamarca, bajo el título de Depósitos Aluviales.

En este trabajo se mantiene el criterio de Merea Llanos, para una serie de depósitos de materiales finos, limos, limos arenosos y arenas finas, que yacen entre las Formaciones Río del Valle y Coneta, las facies proximales al contacto con ésta última suelen presenta lentes interdigitados con arenas gruesas conglomerádicas

Merea Llanos (1981), Nullo (1981) y Blasco et al. (1994) han asignado al Holoceno s.l. a esta unidad. Desde el punto de vista de su génesis, es posible pensar que parte de ellos, sobre todo los que yacen en el centro de la depresión del Valle de Catamarca, a los que Fidalgo (1965) identificó claramente como "Limos parecidos a Loess" podrían ser más antiguos.

Formación Río del Valle

Es Merea Llanos (1981) quién propone esta denominación, que agrupa a las geoformas de agradación, terrazas superior e inferior, generadas por este curso de agua. Tanto Nullo (1981) como González Bonorino (1978) y Blasco et al. (1994), han prestado poca atención a la descripción de los depósitos generados por el río del Valle, que se extienden longitudinalmente por el centro de la depresión del Valle de Catamarca.

Los afloramientos cartografiados se extienden sobre la margen derecha del Río del Valle, limitando en forma interdigital con los depósitos de las Formaciones Paclín y Coneta, su litología es variable y depende del nivel de terrazas, nuestras observaciones

se realizaron sobre la terraza superior, en el corte del camino que une el Parque Industrial con el Aeropuerto (Figura 8)



Figura 8. Foto que muestra los depósitos finos, arenas finas a medianas con laminación paralela de la terraza superior (B) que forma parte de la F. Río del Valle. Sobre esta unidad yacen material limoso, eólico, de origen dunario.

CONCLUSIONES

Las principales deducciones en nuestra área de estudio, es la realización de una cartografía geológica de mayor detalle, que a partir de los controles de los afloramientos de campo nos ha permitido diferenciar diferentes depósitos aluviales provenientes de la cuenca del río El Tala-Ongolí.

A partir de las observaciones de campo fue posible diferenciar los relictos de un antiguo cono aluvial sobre elevado, reconocido como primer nivel de piedemonte y cuyas características litológicas corresponde a facies de gravas alteradas por fenómenos de termoclastía.

Por otro lado, el análisis realizado nos permite aseverar que el Cono Aluvial de Catamarca definido como Formación Coneta, sus depósitos lobulares de su geoforma muestran una migración del NNE hacia el Sur, al mismo tiempo sus sedimentos gravosos presentan una alteración con una cubierta de pátina de carbonato de calcio en el mismo sentido que la variación de la generación de sus diferentes lóbulos de agradación, de tal manera que el Lóbulo inferior no presenta patina carbonosa.

Si se comparan las alteraciones de las gravas de la F. Concepción con las de Coneta, se tiene una variabilidad paleo-climática relevante, en la primera unidad existieron condiciones climáticas con gran amplitud térmica, que generó en los sedimentos una

alteración propia de termoclastía, mientras que en la segunda unidad (F. Coneta-Lóbulo superior) las condicione paleo-climáticas fueron diferentes, dado que las gravas presentan una cubierta carbonosa propia un clima árido a semi-árido con elevada evaporación ambiental.
Finalmente, el Lóbulo inferior, cuyas gravas no presenta alteración es consecuente con las condiciones climáticas actuales del valle central de Catamarca.

REFERENCIAS

Aceñolaza, F., G. y Toselli, A. *Esquema geológico de la sierra de Ancasti, provincia de Catamarca*, Acta Geológica Lilloana, XIV: 233 – 259. (1967).

Aceñolaza, F., G., Miller, H. y Toselli, A. *Geología de la sierra de Ancasti.* Münster Forschungen zur Geologie un Pälaontologie. Heft 59, 372p. Münster. (1983).

Blasco, G.; Caminos, R.L.; Lapido, O.; Lizuaín, A.; Martínez, H. y Nullo. *Hoja Geológica 2966-II, San Fernando del Valle de Catamarca*, Boletín N° 212, Direc. Nac. Serv. Geol. – Sec. Min. De la Nación. (1995).

Eremchuk, J. E. *Geología urbana y ambiental de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca*. Geología del Noroeste Argentino, Tomo II – 125:131 – Relatorio, XIV Cong. Geol. Arg. (2002).

Fidalgo F. *Geología del Pleistoceno del Valle de Catamarca*. Serv. Geol. Nac. Bs. As. Informe inédito. (1965).

González Bonorino, F. *Descripción Geológica de la Hoja 14f, San Fernando del Valle de Catamarca*. Boletín N° 160, Servicio Geológico Nacional. (1978)

Larrovere, M. *Petrología de la faja migmatítica entre el flanco noroccidental de la Sierra de Ancasti, su continuación en la Sierra de Aconquija y el flanco nororiental de la Sierra de Ambato*: Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba, tesis doctoral, 234 pp. (2009)

Merea Llanos, A. *Geología y aspectos sedimentológicos en la depresión tectónica de Catamarca*. Amps. Arg. T. XII 1-2. (1981).

Nullo, F., E. *Descripción geológica de la hoja 15f, Huillapima, provincia de Catamarca*. Servicio Geológico Nacional, Boletín nº 178, 62p. (1981).

VARIACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA ENTRE LOS AÑOS 1990-2020 EN UNA CUENCA SERRANA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Aperlo D.[a] y Gaspari F. J.[a]

[a] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

La dinámica hídrica de una cuenca está determinada por varios factores, tales como el tipo de pendiente, estructura y textura de los suelos, la vegetación presente en función del uso que realiza el hombre del lugar, y el clima de la región. El uso del antrópico y un manejo deficiente del suelo genera una progresiva degradación de las cuencas hidrográficas, lo que lleva hacia un agotamiento del recurso suelo-agua-vegetación, afectando tanto su calidad como su disponibilidad. De esta manera, es el principal modificador, a corto plazo, de la vulnerabilidad hídrica. Esta última se considera como un proceso que provoca un cambio en el "estado" del sistema hidrológico, que a su vez origina consecuencias dentro de una cascada de efectos. Esto conlleva a situaciones críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad del agua que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas. El objetivo del trabajo fue estudiar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca alta del Río Sauce Chico, Tornquist, Buenos Aires, en los años 1990 y 2020. Para ello se realizó un análisis cuali y cuantitativo mediante la utilización de programas Idrisi y QGis como modelo geo-espacial basado en una objetividad biofísica que considera el uso y cobertura del suelo, características edáficas, topográficas y climáticas. Los resultados expresan el riesgo de erosión en la cuenca y el estado de vulnerabilidad hídrica ante el avance de técnicas agropecuarias conservacionistas, concluyendo que se identificó un aumento en la infiltración, y mayor rendimiento hídrico según su distribución espacio temporal.

Palabras claves: Vulnerabilidad hídrica, Riesgo de erosión, Rendimiento hídrico, Uso de suelos.

INTRODUCCIÓN

La dinámica hídrica de una cuenca está determinada por varios factores, tales como el tipo de pendiente, estructura y textura de los suelos, la vegetación presente en función del uso que realiza el hombre del lugar, y el clima de la región.

El uso del antrópico y un manejo deficiente del suelo genera una progresiva degradación de las cuencas hidrográficas, que conduce hacia un agotamiento del recurso suelo-agua-vegetación, afectando tanto su calidad como su disponibilidad. De esta manera, es el principal modificador, a corto plazo, de la vulnerabilidad hídrica (VH).

La VH se considera como un proceso que provoca un cambio en el "estado" del sistema hidrológico, que a su vez origina consecuencias dentro de una cascada de efectos. Esto conlleva a situaciones críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad del agua que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas.

Considerando esta situación, el objetivo del trabajo fue estudiar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca alta del Río Sauce Chico, Tornquist, Buenos Aires, en los años 1990 y 2020. La VH se analizó a través de la zonificación del riesgo de erosión por escurrimiento superficial.

Los cambios de cobertura y uso del suelo son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con una influencia muy importante en la dinámica hídrica superficial. En este contexto, la cuenca hidrográfica es la unidad natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico, económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión (Gaspari et al, 2009)

La cuenca estudiada constituye la cabecera del rio Sauce Chico, en el suroeste de la Provincia de Buenos Aires, se extiende por los partidos de Saavedra, Tornquist y Coronel Suarez (Gaspari, 2000) (ver Fig. 1), abarcando un área de 373,24 km^2, en el sistema orográfico de Ventania, conformando la zona de recarga hídrica de la cuenca (Torrero, 2009), finalizando en la región de Bahía Blanca.

Según Vázquez & Zulaica (2011) en la zona serrana del sudeste de la provincia de Buenos Aires, la erosión hídrica superficial provoca una decreciente producción agropecuaria, consecuencia del actual manejo del suelo, la pérdida del horizonte superficial y de la disponibilidad de agua superficial y subterránea. En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación.

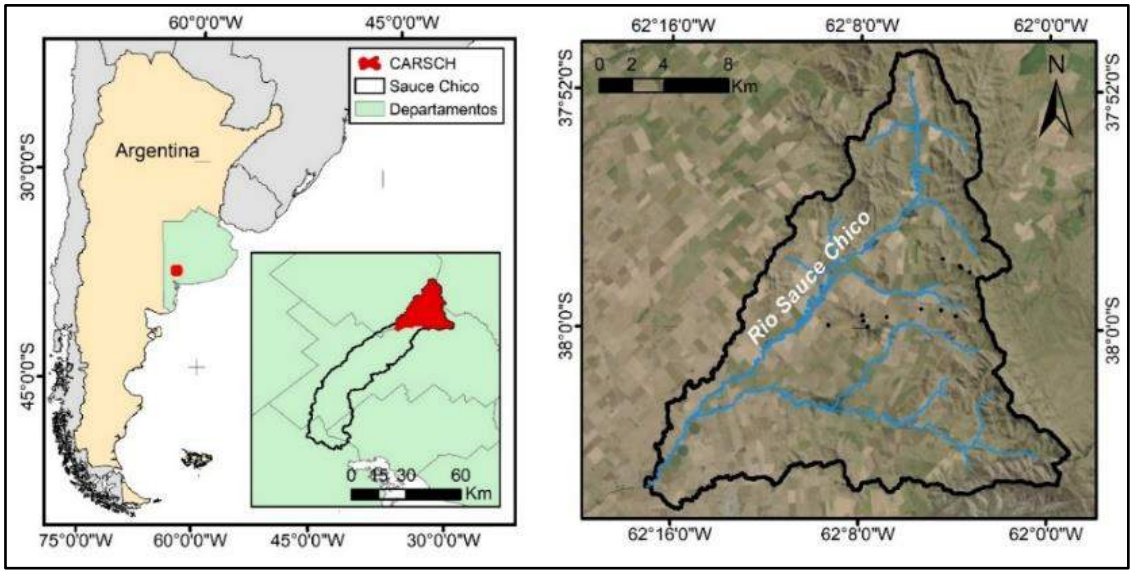


Figura 1. Ubicación de la Cuenca alta del Río Sauce Chico, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

En la cabecera de la cuenca las sierras se elevan entre 400 y 700 m de la llanura circundante, están compuestas por cordones sub-paralelos cuya diferencia altitudinal es marcada y debida al levantamiento diferencial de los distintos bloques. Estos cordones están separados por una depresión que forma los valles de la cuenca del río Sauce Grande hacia el sur y la cuenca del río Sauce Corto hacia el norte (Gil, 2009).

El clima, clasificado como templado y subhúmedo seco, está caracterizado por inviernos húmedos, veranos secos, cuyo promedio anual es de 750 mm anuales en el período estudiado, cuya de tendencia muestra una disminución hacia la actualidad (Aperlo y Gaspari, 2020). Los principales suelos son clasificados como argiudoles, hapludoles y haplustoles (INTA, 1986).

La región se caracteriza por presentar aptitud agrícola-ganadera (INTA, 1986). El tipo de vegetación nativa predominante es la estepa graminosa, y particularmente, la cabecera de la cuenca se desarrolla sobre terreno rocoso, con pendientes que varían entre el 8 y 20 %. En la parte media hasta su desembocadura se extiende sobre terreno tipo loess con pendientes entre el 0,5 y 3 %, donde se desarrollan actividades agrícola-ganadera, con y sin prácticas conservacionistas.

MÉTODOS

Se realizó un análisis cuali y cuantitativo para zonificar la cobertura vegetal y sus suelos, mediante sistemas de información geográfica (SIG), por la utilización de programas Idrisi Taiga y QGis 3.14, conformando un modelo geo-espacial basado en una objetividad biofísica, que considera el uso y cobertura del suelo, características edáficas, topográficas y climáticas.

En principio se realizó un análisis geoespacial, con la utilización de QGis, sobre la distribución y tipo de vegetación y cobertura vegetal sobre la cuenca, para los años 1990 y 2020 (ver Fig.2).

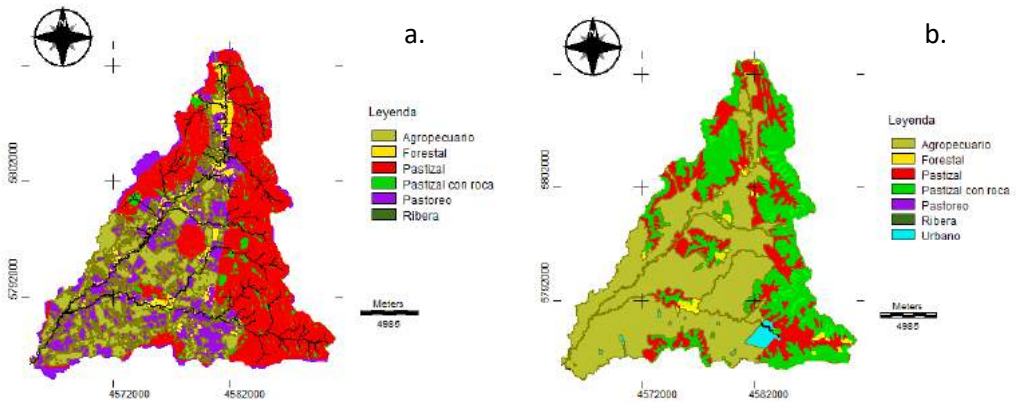


Figura 2: Uso de suelos en el año 1990 (a) y año 2020 (b). Fuente: Aperlo and Gaspari (2020).

Paso seguido se generó el análisis geoespacial del escurrimiento por el método de Número de Curva (NC), mediante el cruzamiento del mapa de cobertura vegetal y las características texturales de suelo, agrupadas en Grupos Hidrológicos (GH), logrando la zonificación por complejo suelo-vegetación. Con dicha información, se le realizó una tabulación cruzada según pendientes del terreno, para obtener los Riesgos Potencial Erosivos, todo realizado en los dos momentos del estudio, en los años 1990 y 2020 (Gaspari et al, 2015).

La aplicación del modelo requiere de cartografía en formato vectorial, codificadas de forma tal que, luego del rasterizado automático, procesamiento y asignación de valores particulares según el caso, se genera un mapa de distribución de número de curva (NC) a partir del cual se determina lámina de escurrimiento, aplicando la metodología del SCS. El modelo cuantifica el escurrimiento superficial en función del volumen y profundidad de la lámina (Wang et al., 2005) a partir de datos de precipitación (Rodríguez Vagaría y Gaspari. 2014).

Posteriormente, se aplicó el Modelo de Cambio de Uso del Suelo del módulo Land Change Modeler (LCM) de Idrisi Taiga, sobre dichos resultados, para visualizar los cambios del Riesgo de Erosión Potencial entre los años 1990 y 2020.

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial que permite explorar los mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que los ocasionan; a proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y a evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo et al., 2009; Diaz Gómez & Gaspari, 2017).

Para estudiar la vulnerabilidad hídrica, se realizó una simulación geoespacial de dos eventos de precipitación de 26,5 mm y 81,2 mm, con la finalidad de obtener la zonificación del escurrimiento superficial (Q) e infiltración (F) para cada evento, según las Ec. 1 y 2, respectivamente, aplicando el método de NC. Este método, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972), se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada (P en mm) a partir de del complejo suelo-vegetación (NC) y las abstracciones iniciales (Io en mm), determinadas a partir de S, que es el máximo potencial de retención de la cuenca ante un evento de tormenta. El S se calcula según: (25.400 – 254 x NC) (Gaspari et al, 2013; Gaspari et al., 2015).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4\,.\,I_0} \qquad \text{Ec. 1.}$$

$$F = \frac{S\,.\,(P - I_0)}{P - I_0 + S} \qquad \text{Ec. 2.}$$

Luego se analizaron los resultados del LCM para visualizar los cambios de Q y F entre los años 1990 y 2020.

RESULTADOS

Los primeros resultados cartográficos muestran la zonificación del riesgo de erosión potencial (REP) elaborada con anterioridad por Aperlo y Gaspari (2020), indicando el

estado de vulnerabilidad hídrica, la cual ha sido modificada por la influencia del avance de técnicas agropecuarias conservacionistas (ver Fig. 3).

Esta información permitió definir los riesgos persistentes que se generan en la cuenca en estudio según la vulnerabilidad:

- Por disposición: Es una de las principales causas que pone en peligro a este recurso, debido a que la sobrepoblación ha incrementado el consumo y eso ha ido agotando la disposición del agua. Esta es baja, en la zona ene estudio, debido a la implementación de medidas de conservación de suelo en las últimas décadas, que favorecieron el control del movimiento de sedimentos y pérdida de suelo. Además, la urbanización de la cuenca es incipiente.
- Ecológica: Esta se expresa donde se ve amenazado el pastizal nativo y humedales y su enorme biodiversidad, debido al avance de las actividades agropecuarias. Aunque se apliquen medidas de conservación de suelo, las mismas están invadiendo áreas generadoras de agua en calidad y cantidad, y contenedoras de torrentes.
- Climática: Radica en los cambios inesperados que ocurren en el ambiente y que afectan al agua como son las sequías e inundaciones que provocan la modificación de la dinámica hídrica superficial en la cuenca

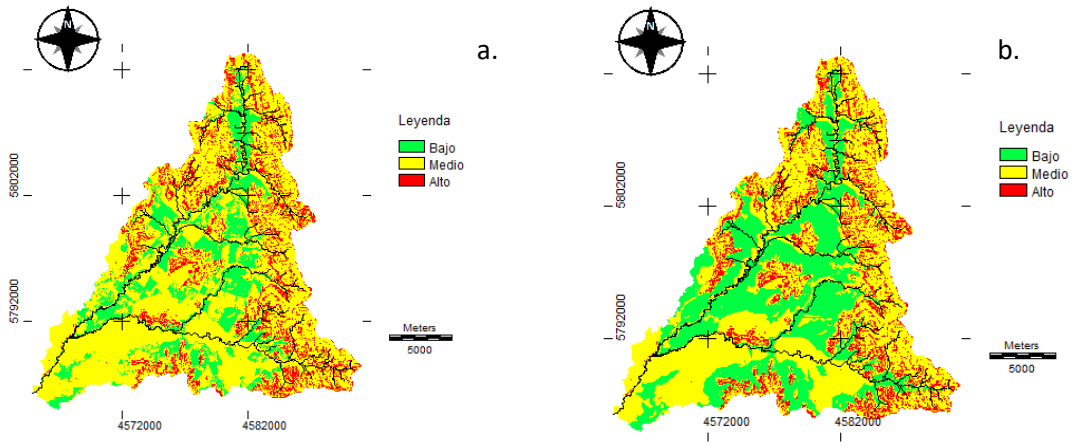


Figura 3: Riesgo de erosión hídrica superficial potencial en el año 1990 (a) y año 2020 (b). Fuente: Aperlo and Gaspari (2020).

La primera parte del estudio (ver Fig. 3) reveló los cambios que se produjeron en los valores de REP, a causa de la variación del uso de suelo en la cuenca, influenciado de manera dominante por el avance de la agricultura en la región. Se observó una mejora en las nuevas zonas ocupadas por la producción agropecuaria con técnicas conservacionistas del suelo, y en menor medida, un aumento del REP sobre los márgenes de los ríos y arroyos de la cuenca, generado por el corrimiento de la vegetación autóctona hacia los márgenes de las corrientes de agua, a causa del avance de la actividad agropecuaria sobre el territorio de la cuenca. Otra región en la que se verificó un aumento del REP es en la zona sudeste de la cuenca, con presencia de asentamientos poblacionales, a causa del gran crecimiento que tuvieron los mismos entre los años 1990 y 2020 (Aperlo y Gaspari, 2020).

En la Fig. 4 se presenta la zonificación lograda por la implementación de la metodología Land Change Modeler, para estudiar los cambios en REP entre los años 1990-2020. Se puede observar la matriz geoespacial de persistencia establece que se generaron pocos cambios en el REP, manteniendo el valor bajo donde se evidencia el avance de las producciones agropecuarias que implementaron actividades conservacionistas del suelo. En zonas donde la producción agrícola se mantuvo, se encuentra el valor Medio. Por último, el REP Alto persistió en las zonas de altas pendientes, sobre las planicies de inundación de arroyos y áreas cercanas a riberas, y zonas de pastoreo. Solo se observaron cambios desde la clasificación Bajo hacia Medio, en la región que pertenece al asentamiento poblacional, que entre los años 1990 y 2020 que creció en gran medida, a partir del año 2000.

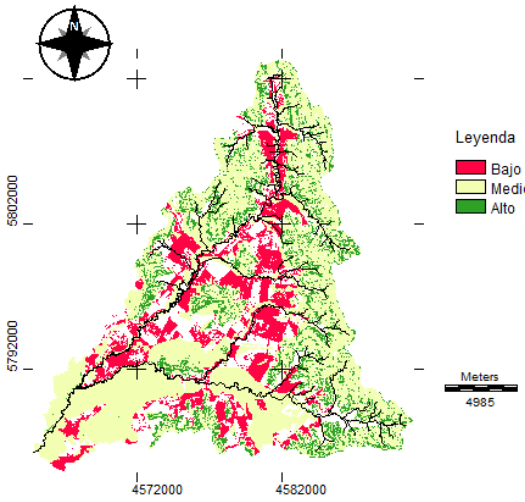


Figura 4. Persistencias de REP en el año 1990 (a) y año 2020 (b) para el análisis de la vulnerabilidad hídrica.

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se representan los resultados de la modelización de la escorrentía (Q) y la infiltración (F) generadas en las dos simulaciones de precipitación, de 81,2 mm y de 26,5 mm, en los dos años estudiados 1990 y 2020, aplicando SIG.

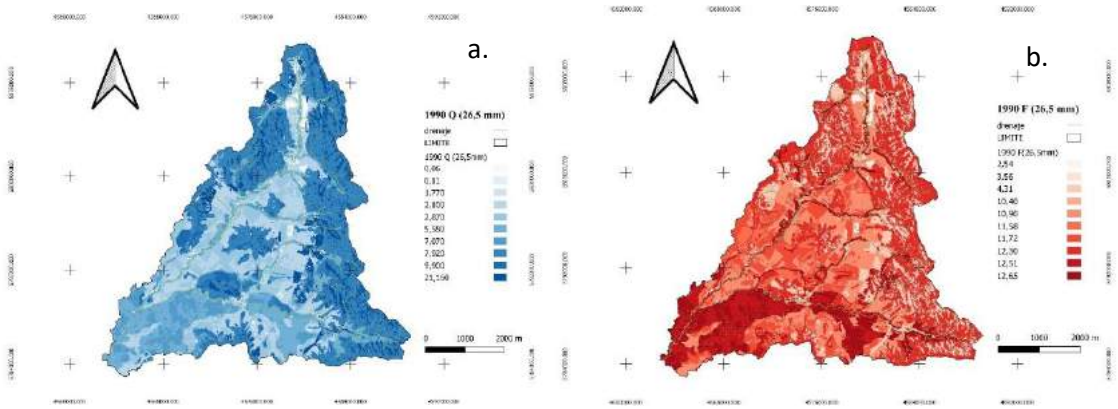


Figura 5. **a**. Q (mm) y **b.** F (mm) para el año 1990 con evento de precipitación de 26,5 mm

En la Fig. 5 se visualiza una que la dinámica hídrica en 1990 está contenida por las abstracciones y reguladas por la cobertura vegetal, lo cual, la baja intensidad pluvial genera solo Q en las zona alta de la cabecera de la cuenca y zonas agrícolas sin medidas de conservación de suelo. La F es mayor en áreas con protección vegetal del suelo.

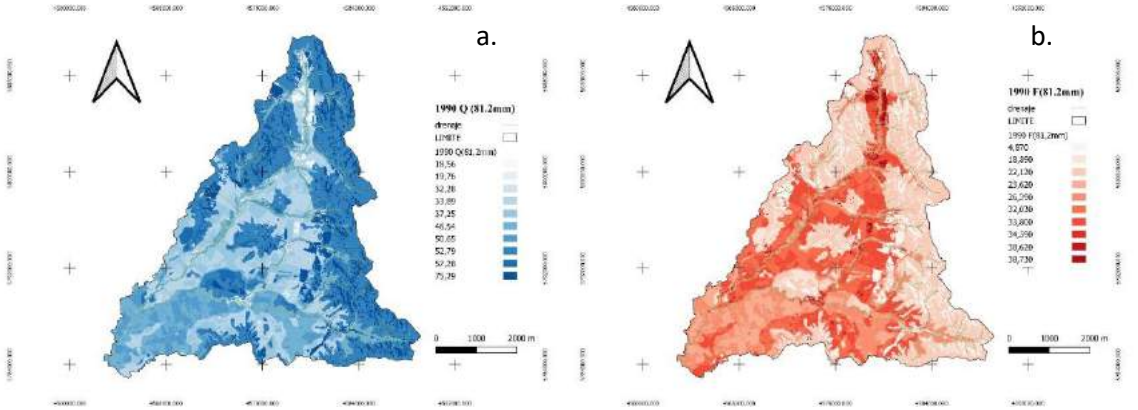


Figura 6. **a**. Q (mm) y **b.** F (mm) para el año 1990 con evento de precipitación de 81,2 mm

La Fig.6. expresa que Q se enriquece por la cantidad de lluvia caída en la cuenca, siendo alta en el área serrana. La F es menor del 50 % en toda la cuenca.

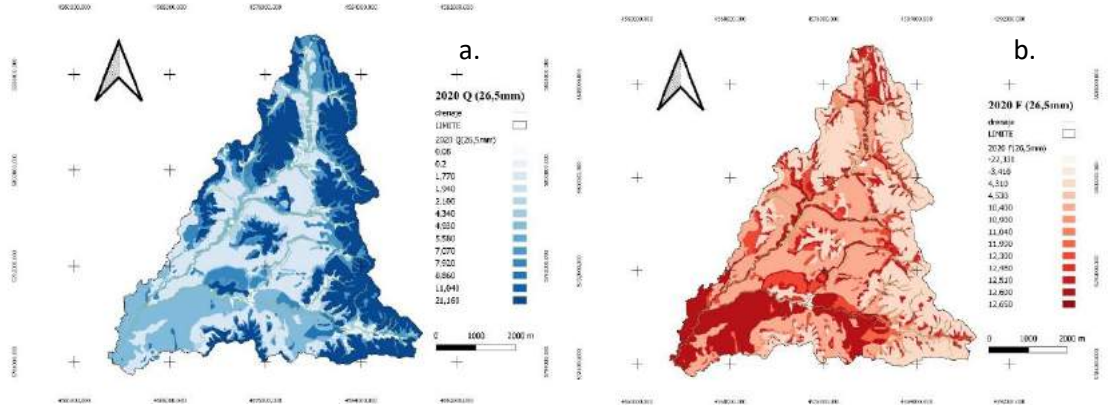


Figura 7. **a**. Q (mm) y **b.** F (mm) para el año 2020 con evento de precipitación de 26,5 mm

En la actualidad, la tormenta de 26,5 mm ha generado alto Q en la zona de pastizal con roca, con pendientes, y áreas urbanas. En estas ultimas y zonas agropecuarias expresan también una mayor infiltración debido al tipo de suelo, siendo las abstracciones las que retienen la mayor parte del recurso pluvial.

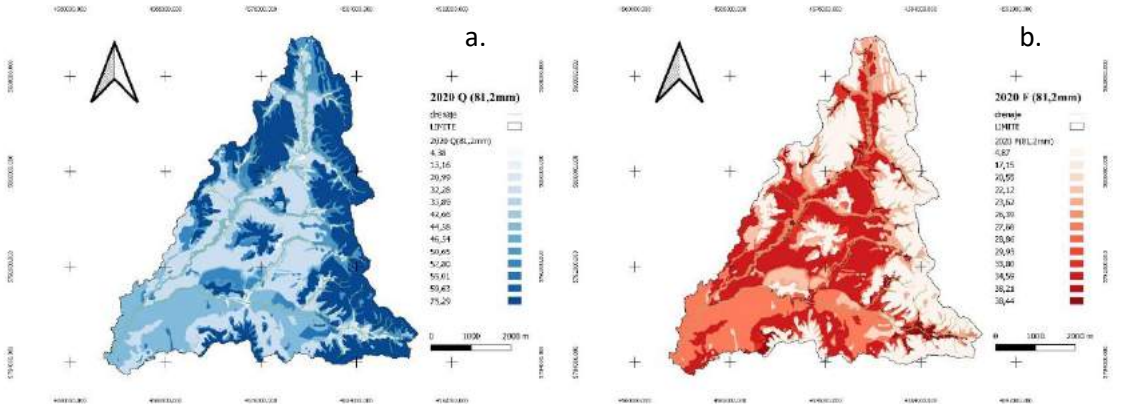


Figura 8. **a**. Q (mm) y **b.** F (mm) para el año 2020 con evento de precipitación de 81,2 mm

La tormenta de 81,2 mm modelada para el uso actual del suelo expresa una alta tasa de escurrimiento en las áreas de cabecera de cuenca, donde esta avanzando el pastoreo. La F es regular en la zona central de la cuenca acompañada por regulares abstracciones.

Las Fig.9 y 10 representan la variabilidad de Io (pérdidas iniciales/abstracciones), la F (infiltración), y Q (escorrentía) establecidos para los diferentes NC presentes en la cuenca para los dos escenarios en los años 1990 y 2020, ante dos lluvias, 81,2 mm y 26,5 mm.

Al analizar y comparar la respuesta de la lluvia de baja intensidad (26,5 mm) entre los dos escenarios, 1990 y 2020, por aplicación del método de NC, se destaca en la actualidad, un aumento de la zona ocupada por Io, con mayor F, y una disminución en Q (ver Fig.9). Estos cambios, están acompañados a la utilización de nuevas tecnologías por la agricultura hacia zonas más elevadas, que realizan sus producciones con apoyo de medidas conservacionista del suelo. Esta situación valora los esfuerzos para reducir el riesgo de que se desencadenen desastres se deben integrar de forma sistemática en las políticas, planes, y programas de desarrollo sostenible y de reducción de la degradación del ambiente disminuyendo la vulnerabilidad hídrica.

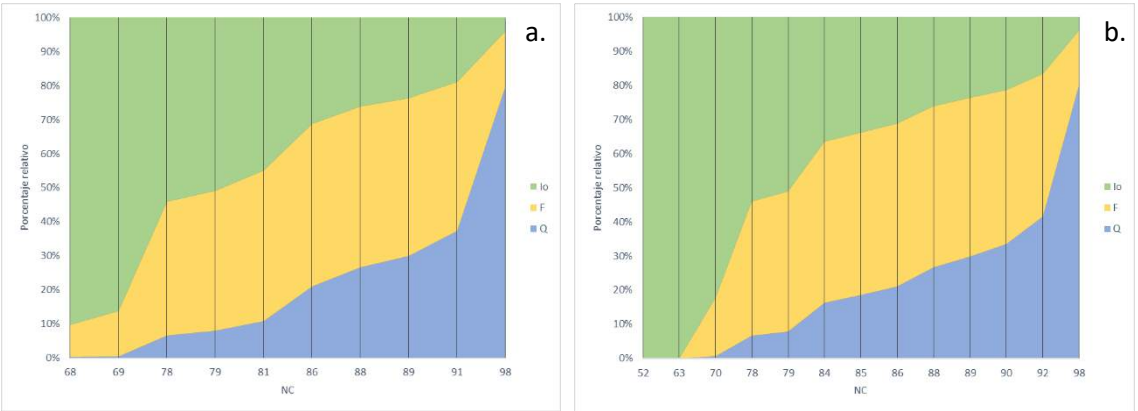


Figura 9. Representación gráfica de Io (mm), Q (mm) y F (mm). **a.** año 1990 y **b.** 2020 frente a una precipitación de 26,5 mm.

La comparación entre los gráficos de la Fig. 10, de los escenarios de 1990 y 2020 frente a un evento de precipitación de alta intensidad (81,2 mm), se verifica que Io disminuyó considerablemente y F / Q se redujeron levemente. En esta comparación los cambios en las variables más relevantes son Io y F, donde el aumento en Io se debe a la mayor ocupación y distribución homogénea en el suelo por la vegetación de las producciones agropecuarias del año 2020.

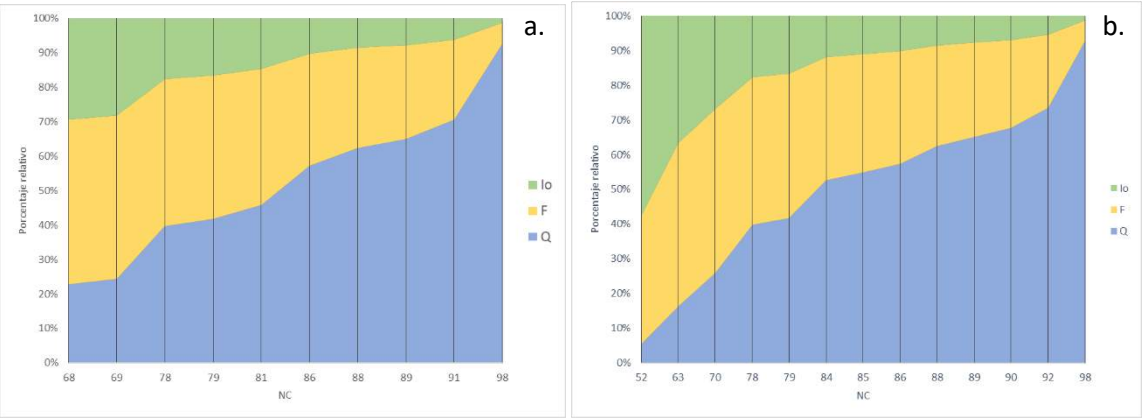


Figura 10. Representación gráfica de la Io (mm), Q (mm) y F (mm), **a.** año 1990 y **b.** año 2020 frente a una precipitación de 81,2 mm.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio realizado identificaron una gran disminución del Riesgo de Erosión Potencial, un aumento en la infiltración total y un mayor rendimiento hídrico según su distribución espacio temporal, de la cuenca. Estos resultados, en gran medida, se deben al aumento de ocupación territorial en la cuenca por parte de las actividades agropecuarias, que incluyen metodologías conservacionistas del suelo.

Dichos resultados demuestran la importancia y el gran potencial de disminución de la vulnerabilidad hídrica en áreas con aplicación de técnicas conservacionistas en la cuenca, teniendo en cuenta que, además, las mejoras conllevan una mejora en la producción, la utilización del suelo, el equilibrio y distribución de la vegetación y el manejo del agua. Concluyendo que la sustentabilidad del ecosistema está favorecida, sin que la aptitud de los suelos fuera subutilizada.

Los esfuerzos para reducir el riesgo de erosión hídrica en una cuenca hidrográfica, y por ende su vulnerabilidad, integra de forma sistemática potenciales políticas, planes, y programas de desarrollo sostenible y de reducción de la pobreza y mejora del ambiente.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores -

Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Aguayo M., Pauchard, A., Azócar, G. y O. Parra. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. Revista Chilena de Historia Natural 82: 361-374 p. (2009).

Aperlo, D. y F. Gaspari. Estudio sobre el cambio de riesgo de erosión por escurrimiento superficial en una cuenca serrana bonaerense como un soporte de información para la planificación estratégica. II Congreso Virtual: Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales. "Pensando alternativas para el abordaje ambiental". ISSN: 978-99905-809-7-6. 21 al 30 de Septiembre de 2020. La Paz, Bolivia. http://congresos.cebem.org/ En edición. (2020)

Díaz Gómez, A.R. y F.J. Gaspari.. Modelización geoespacial del escurrimiento superficial en cuencas vulnerables al cambio de uso del suelo. Revista CINEA. Volumen 5 N° 1: 29-47. (2017). ISSN: 2347-0941. (2017).

Gaspari, F J.. Ordenamiento territorial en cuencas serranas aplicación de sistemas de información geográfica (SIG), 1a ed, - Buenos Aires: Universidad Internacional de Andalucía. España. (2000).

Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A. y S. Besteiro. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición. La Plata. 321 pp. (2009)

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, I. & Besteiro, S.. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Universidad de La Plata (Ed.). 1ª ed. La Plata, Buenos Aires, Argentina. (2013).

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E. y A. R. Díaz Gómez. Modelización hidrológica con L-THIA en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Buenos Aires, Argentina. XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná. Argentina. 8 p. (2015).

Gil, V.. Hidrogeomorfologia de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al Peligro de crecidas (Tesis de doctoral). Recuperado de http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/2069/1/TESIS_GIL.pdf. (2009).

INTA.. Aptitud y uso actual de las tierras argentinas. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Proyecto PNUD. Argentina 85/019 Área Edafología. 32 p. (1986).

Vázquez, P. y L. Zulaica. 2011 Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. Revista Párrafos geográficos, Vol 10, N° 2. 242-267. (2011)

Rodríguez Vagaría, A.M. y F.J. Gaspari.. Modelización espacial del escurrimiento medio anual en la cuenca serrana bonaerense. Séptimo Congreso de la Ciencia Cartográfica "Logros y desafíos de la Cartografía". 19 y el 21 de Noviembre de 2014, Buenos Aires. Argentina. (2014).

Sandoval, V y V. Oyarzun. Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. Revista Quebracho 11: 9-21. (2004).

Torrero, M.. Río Sauce Chico: Estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable (Tesis doctoral). Recuperado de http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/1978/1/Torrero.pdf . (2009).

Wang, Y., Choi, W., Deal, B. M.. Long-term impacts of land-use change on nonpoint source pollutant loads for the St. Louis metropolitan area, USA. Environmental Management, 35(2), 194-205. (2005).

DESASTRES PEQUEÑOS E INVISIBILIZADOS. LAS AFECTACIONES EN LA PRODUCCIÓN FAMILIAR DE LA PROVINCIA DE MISIONES POR EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS: PRIMERA APROXIMACIÓN

Bach J. T.[a], Patat G. [a], Pereira S. G.[a] y Viand J. M.[a]

[a]*Instituto de Geografía "Romualdo Ardissone, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: sanper@filo.uba.ar

RESUMEN

En la provincia de Misiones (Argentina), la agricultura familiar (AF) representa una proporción significativa de la producción agropecuaria. Esto se debe principalmente a dos factores: por un lado, este tipo de producción está ampliamente extendida en el territorio; y, por el otro, la cantidad de establecimientos agropecuarios de pequeñas dimensiones es la más alta del país. Esto convierte a la producción de Misiones en un caso único. A raíz de ello, se considera pertinente profundizar en el impacto que conllevan los eventos hidrometeorológicos extremos en los productores. El presente trabajo es un primer avance de nuestra investigación sobre esta problemática. Se ha recurrido a información hemerográfica provista por el diario El Territorio Misiones y la base de datos DesInventar a fin de identificar los eventos extremos que ocurren frecuentemente en el territorio provincial y determinar los daños resultantes. Esta investigación se sustenta en el concepto de pequeños desastres, acuñado por Wilches Chaux, por el cual la sucesión de fenómenos de baja intensidad puede configurar un contexto de gran vulnerabilidad para los damnificados por el efecto acumulativo de los daños.

Palabras Claves: agricultura familiar, pequeños desastres, eventos hidrometeorológicos.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo es parte de una investigación mayor en el marco del proyecto Filo: CYT titulado "Riesgos hidrometeorológicos, producción familiar y vulnerabilidad. Casos de estudio en la provincia de Misiones (Argentina)" (FC19: 085). A continuación, se presentan los primeros avances de la investigación. El objetivo de este artículo es analizar la forma en que los eventos hidrometeorológicos afectan la producción de la agricultura familiar en la provincia de Misiones y determinar qué rol desempeñan los productores y los organismos estatales en la resolución de conflictos y la mitigación del daño ambiental.

La **Agricultura familiar (AF)** es un tipo de producción agropecuaria que se caracteriza por la participación directa del titular de la explotación y su grupo familiar, así como por el uso de los propios medios de producción. Se acuerdo con el Censo Nacional Agropecuario (CNA) de 2002[1],en la Argentina, la superficie total manejada por agricultores familiares apenas representa el 15%, por lo que este sector parecería no ser tan significativo. Sin embargo, si se toma en cuenta la cantidad de establecimientos

[1] Con la publicación de los datos definitivos del Censo Nacional Agropecuario de 2018, se actualizarán los datos.

agropecuarios (EAP) explotados, el panorama es diferente ya que se calcula que la AF abarca unos 250.000 EAP, lo que representa el 75% de los EAP del país (Obschatko, 2009).

A nivel nacional, la AF es de gran importancia en la producción de alimentos, fibras textiles y diversos cultivos de las economías regionales, la cual se orienta tanto al mercado interno como externo. En efecto, los agricultores familiares representan casi la totalidad de los productores de tabaco, yerba mate, algodón y caña de azúcar. Además, se ocupan de desarrollar la amplia mayoría de las explotaciones hortícolas y frutícolas, y de los cultivos extensivos (principalmente, maíz y soja). De este modo, la AF constituye una fuente de empleo e ingresos para muchos hogares en los espacios rurales (Obschatko, 2009).

Sin embargo, pese a la relevancia que tiene en estos aspectos, hay una multiplicidad de problemas que condicionan el desarrollo de la producción, así como la distribución y comercialización de los bienes obtenidos (Aradas y Golsberg, 2010). Habitualmente, los productores familiares deben enfrentar numerosos obstáculos; por ejemplo, la dificultad de acceso a tecnología de punta y a seguros agropecuarios confiables, lo cual genera enormes desventajas en la competencia contra otros productores que cuentan con mayores recursos. De todos modos, se debe tener en cuenta que, en cada provincia, la AF presenta características y problemáticas específicas.

El caso de Misiones es de interés puesto que en esa jurisdicción la AF es uno de los factores distintivos de la producción agropecuaria, siendo que este tipo de productores representan una mayoría casi absoluta. Los cultivos agroindustriales típicos (yerba mate, té y tabaco), que son destinados a la venta en los secaderos locales, son llevados adelante casi exclusivamente con mano de obra familiar. Lo mismo sucede con la huerta y la granja, que garantizan la reproducción familiar. En total, se estima que la AF genera el 51% del valor bruto de producción (VBP) (Craviotti, 2014).

Con frecuencia, los productores misioneros son duramente afectados por eventos hidrometeorológicos extremos, como lluvias intensas, granizadas y heladas. También se encuentran expuestos al efecto acumulativo que se genera a partir de la repetición de eventos de bajo impacto; por ejemplo, luego de una semana de lluvia ininterrumpida, que termina por dañar severamente los cultivos. En este contexto, es importante mencionar que Misiones se encuentra en la tercera zona más húmeda del país, luego de los Andes patagónico-fueguinos y el faldeo oriental de las sierras subandinas. En temporadas normales, se registran aproximadamente 1.800 mm al año, con importantes inundaciones estacionales, y en períodos extraordinarios las precipitaciones anuales pueden superar los 2.000 mm (Barros y Perczyk, 2006). Esto puede configurar un cuadro problemático para los agricultores familiares.

Dada la problemática señalada, un concepto que encuadra esta investigación es el de **desastre**, utilizado por Wilches-Chaux (1993) en uno de los primeros libros clásicos de *La Red*. Este investigador considera como tal todo evento súbito de origen natural o humano, o bien cualquier sucesión de eventos frecuentes y permanentes que:

- obliga a los habitantes de una población a abandonar sus hogares, posesiones y/o rutinas de trabajo;
- ocasiona la pérdida de bienes materiales o productivos;
- provoca el deterioro de la calidad de vida de la comunidad, y/o
- pone en peligro el patrimonio de la población.

Siguiendo la línea del autor, otro concepto que se ajusta a este estudio es el de **pequeños y medianos desastres**, el cual refiere a todos aquellos eventos que en forma aislada presentan baja intensidad, pero cuyos efectos, de manera acumulada, pueden llegar a ser tan graves como los grandes desastres. Generalmente, estos fenómenos pasan desapercibidos (a veces ni siquiera son informados adecuadamente en los medios de comunicación), y sus efectos no trascienden, o no pasan del nivel local (Wilches-Chaux, 1998).

Incluso, si se repiten con cierta regularidad, deja de ser evidente que se está ante una situación de desastre. Así, en estas circunstancias, las fronteras entre los desastres y la vida cotidiana se vuelven cada vez más borrosas. Es por ello que para este estudio se conciben los pequeños y medianos desastres de los productores familiares como invisibilizados (Wilches-Chaux, 1998).

MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo a partir del uso de dos fuentes principales. En una primera instancia, se consultó la base de datos *DesInventar* (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [UNDRR] y Fundación OSSO, 2017), la cual recopila información sobre los desastres ocurridos en la Argentina relevados en los diarios nacionales entre 1970 y 2015[2], y los sistematiza a escala provincial y municipal. En la base se realizó una selección de búsqueda de los casos registrados en Misiones y se relevaron los eventos más recurrentes en la provincia (de acuerdo con la información cualitativa existente).

En una segunda instancia, se consultó el periódico *El Territorio Misiones*, uno de los diarios locales más importantes. La elección de este periódico se debió a que es una de las fuentes disponibles para su consulta en la hemeroteca de la biblioteca del Congreso de la Nación Argentina[3] en forma gratuita durante las 24 hs. Se buscaron noticias en las que se mencionaran desastres originados por fenómenos naturales extremos, para identificar, de esta manera, los principales riesgos que deben enfrentar los productores.

El recorte temporal seleccionado para la búsqueda corresponde a los años 2014-2017. Esto se debe a que son algunos de los años que aparecían mejor documentados en la biblioteca del Congreso. Con respecto a otros años, la Hemeroteca no tenía todos los periódicos: en algunos casos faltaban meses completos y en otros solo había algunos números faltantes, lo cual limitaba seriamente la investigación.

Para sistematizar la información recolectada, se diseñaron fichas con un criterio uniforme, el cual seguía una lógica parecida a la metodología con la que había sido construida la base de *DesInventar*. Esto se hizo para mantener la coherencia en el relevamiento de los datos, además de que hacía que fuera más sencillo detectar los eventos, las afectaciones y su localización geográfica. De cada artículo, se indicaron las zonas afectadas, las características de los productores damnificados, la magnitud de los daños, la peligrosidad

[2] La base fue actualizada en 2017.

[3] Biblioteca del Congreso de la Nación- Hemeroteca diarios. Adolfo Alsina 1831, CABA. Tel. (011) 4378-5655 int. 1050. Consultas: diarios@bcn.gob.ar.

de los eventos naturales y la respuesta que brindaron la comunidad, las asociaciones civiles y los organismos gubernamentales [ver Fig. 1].[4]

Dada la escasez de información hemerográfica local, en una próxima instancia, se recurrirá a la historia oral. Para ello, se desarrollará una serie de entrevistas a miembros de las ferias francas de Misiones y funcionarios de los organismos públicos locales, las cuales serán realizadas de manera virtual. Asimismo, se pretende hacer una búsqueda más exhaustiva respecto de los fenómenos meteorológicos que ocurren en la provincia, a partir de informes de organismos oficiales, como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Fuente		
Diario:	Fecha:	
Período:	Departamento:	Duración:
Evento		
Tipo de evento:		
Afectados:		
Daños:		
Actores intervinientes		
Organizaciones sociales:		
Entidades públicas:		
Agrupaciones civiles:		
Respuesta del Estado:		

Figura 1. Modelo de ficha de relevamiento de la información. Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los datos obtenidos de *Desinventar* (UNDRR y Fundación OSSO, 2017), los desastres ocurridos en Misiones que han sido más documentados en los periódicos nacionales son aquellos desencadenados por las inundaciones, las tempestades, los vendavales, las sequías, las heladas y las granizadas (ordenados de mayor a menor frecuencia). En particular, las inundaciones son las que presentan el mayor número de entradas en la base de datos, con una cifra muy superior al segundo desastre más

[4] Al poco tiempo de haber comenzado la consulta del material en la Hemeroteca, se desató la pandemia del Covid-19 en la Argentina y la BCN, por lo que la búsqueda debió ser suspendida. Es así que, por el momento, solo se han relevado los años 2015, 2016 y 2017.

documentado (las tempestades). Por su parte, los otros desastres presentan valores muy reducidos en comparación a los dos primeros.

A nivel local, las noticias sobre desastres son principalmente sobre Posadas e Iguazú, que son las ciudades más pobladas y que presentan mayor relevancia desde el punto de vista económico para la provincia y el país [ver Fig. 2] (UNDRR y Fundación OSSO, 2017).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la información que relevan los diarios generalmente no refleja la totalidad de los eventos que se producen en la realidad, ya que solo tienden a mostrar aquellos que resultan más llamativos o que se cree que tendrán un mayor impacto mediático. Esto se acentúa al tratarse de periódicos nacionales, que hacen una selección y brindan información más limitada sobre los eventos locales de las provincias. En consecuencia, el hecho de que ciertos fenómenos no hayan sido informados en los periódicos o de que hayan tenido una cobertura reducida, como sucede con el caso de las granizadas y las heladas, no implica necesariamente que no hayan ocurrido, que no sean frecuentes o que no tengan relevancia para los productores familiares.

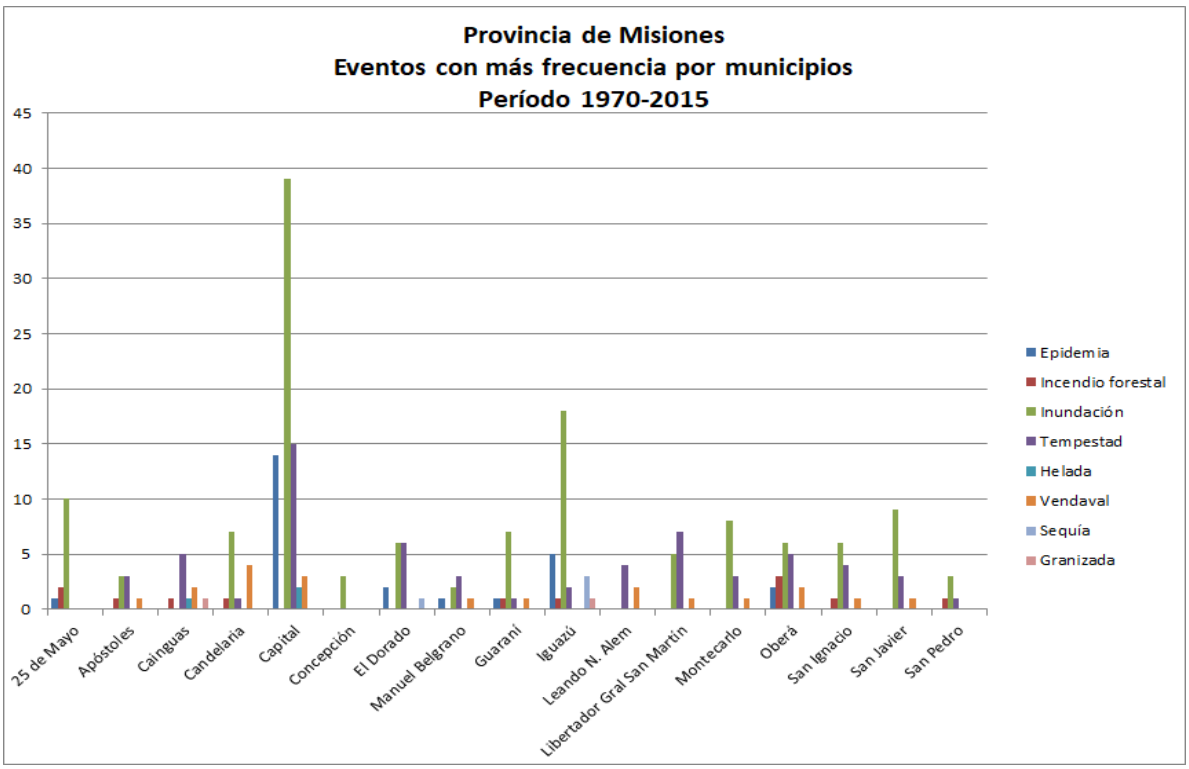


Figura 2. Eventos con mayor frecuencia por Municipios en Misiones, período 1970-2015.
Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos *DesInventar* (UNDRR y Fundación OSSO, 2017).

De esta manera, la información relevada hasta el momento funciona como una primera aproximación a la temática. Permite conocer los desastres que tienen mayor repercusión, aquellos que son de mayor interés para la sociedad y las autoridades. Pero para determinar la frecuencia y la recurrencia de los fenómenos hidrometeorológicos en la provincia se hace necesario hacer una búsqueda de los registros de estaciones meteorológicas, algo que, como se mencionó anteriormente, se planea hacer en una siguiente instancia del proyecto de investigación.

En los artículos periodísticos de *El Territorio Misiones* que se revisaron hasta el momento, correspondientes a los años 2015, 2016 y 2017, los principales eventos hidrometeorológicos que afectan la provincia y, por lo tanto, a las producciones familiares, son los temporales, las lluvias intensas, las tormentas eléctricas, las granizadas y las heladas. También se registró un artículo en el cual se mencionan los perjuicios originados por una ola de calor excepcional para el mes de abril, la cual había alcanzado los 42 ºC. En el siguiente mapa se observan las localidades que aparecían mencionadas en los artículos por haber sido afectadas durante los desastres [ver Fig. 3] (*El Territorio Misiones*, 2015-2017).



Figura 3. Departamentos y localidades afectadas por eventos hidrometeorológicos en la provincia de Misiones.
Fuente: Elaboración propia, a partir de *El Territorio Misiones* (2015-2017) y capas de información geográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN)[5].

Los daños que experimentan los productores, según los periódicos vistos, son los siguientes.

- Destrucción de cultivos comerciales y de subsistencia, y muerte de animales de corral. Algunos cultivos, como la yerba mate, pueden tardar hasta cinco años en recuperarse.
- Disminución en la calidad de los cultivos. El exceso de humedad en el suelo favorece, junto con las altas temperaturas de la provincia, la proliferación de hongos que generan malformaciones en las plantas. También se registran hojas manchadas y de mayor dureza.

[5] Disponible en: https://geoportal.ign.gob.ar/ (fecha de consulta: noviembre de 2020).

- Daños en el tendido eléctrico y cortes de luz y de agua potable que pueden extenderse por varios días.
- Caída de árboles, obstrucción de caminos y daños en la infraestructura, lo cual implica un peligro para la población.
- Pérdidas materiales para los productores. Esto incluye daños parciales y totales en sus viviendas y en sus instalaciones productivas (rotura de invernaderos, toldos, centros de acopio, etc.). Algunas familias de pequeños productores, además, deben ser evacuadas o relocalizadas por su extrema vulnerabilidad, derivada del hecho de que viven en zonas inundables (sectores bajos y/o cercanos a los ríos y arroyos) y sus viviendas son muy precarias (están construidas de chapa y cartón).
- Daños en caminos vecinales, lo que dificulta la asistencia a los damnificados.
- Mortalidad en relación a los desastres. Se registró el deceso de dos mujeres, una a causa de un fuerte golpe originado por el desplome de un tronco y la otra por el impacto de un rayo (*El Territorio Misiones*, 2015-2017).

Frente a estos eventos, los productores llevan adelante distintas medidas para hacer frente a esta situación y mejorar la calidad de vida de los damnificados. Una de las acciones que desarrollan es solicitar ayuda estatal para reemplazar las estructuras averiadas. Por ejemplo, en distintas ocasiones se mencionó que los productores necesitaban construir y/o reconstruir sus invernaderos para mantener la producción en funcionamiento todo el año. También hacen relevamientos de los daños para identificar el número exacto de afectados y, de esta manera, encarar los pedidos de asistencia al Estado. Además, toman solicitudes de los afectados para recibir donaciones de colchones, chapas y alimentos (*El Territorio Misiones*, 2015-2017).

En algunos casos, las comunidades afectadas también desarrollan acciones autogestionadas para asistir a la población local. Por ejemplo, algunas iglesias y comedores comunitarios juntan donaciones de alimento y abrigo para los niños y ancianos. Por su parte, algunos vecinos realizan protestas para manifestar acerca de los problemas que les causan los eventos hidrometeorológicos extremos, e incluso aquellos que ocurren en la normalidad (*El Territorio Misiones*, 2017-2017).

Desde el Estado, las respuestas a los incidentes se pueden resumir de la siguiente manera.

- Reparación de vías de circulación.
- Conformación de comités entre distintos organismos públicos para atender la emergencia, incluyendo la participación de bomberos, policías, autoridades municipales, fuerzas armadas, defensa civil, ministerio de desarrollo social, etc.
- Relevamiento del territorio y las personas afectadas.
- Entrega de chapas de metal, cartones, tirantes, colchones, ropa, alimentos no perecederos, y semillas de hortalizas y verduras a los damnificados (*El Territorio Misiones*, 2017-2017).

Sin embargo, la ayuda estatal muchas veces resulta insuficiente volviéndose más bien un paliativo al problema; por ejemplo, los afectados deben colocar ellos mismos los materiales de construcción y reparar las instalaciones de trabajo.

Nuevamente, los resultados a los que se ha llegado hasta el momento son aproximativos y deben ser complementados con otras fuentes de información. Además, en el relevamiento de los periódicos surgieron varias dificultades. En primer lugar, había algunos días e incluso meses completos que no estaban en los depósitos de la Biblioteca del Congreso,

por lo que el relevamiento no ha sido completo. A su vez, los artículos recopilados por lo general presentaban una descripción pormenorizada de los hechos, arrojando escasa información acerca de la cuantificación de los daños a los productores o de las regiones geográficas más afectadas. Por otra parte, en su mayoría, los artículos sobre eventos hidrometeorológicos que se encontraron abordan *zonas urbanas*, principalmente la situación en Posadas (capital provincial) y sus alrededores. Las zonas rurales, en cambio, son menos tenidas en cuenta en las noticias locales. En los diarios nacionales, directamente casi no se registra información sobre la afectación que sufren los productores familiares mediante eventos hidrometeorológicos.

CONCLUSIONES

La información relevada hasta el momento constituye un primer paso de aproximación a la realidad que se desea analizar. Por cuestiones externas relacionadas con el estallido de la pandemia de Covid-19, no se han podido realizar varias acciones previstas en el proyecto de investigación, que resultan esenciales para hacer un desarrollo más profundo y presentar datos más precisos. De este modo, la indagación aún se encuentra inconclusa, faltando complementar las fuentes analizadas con trabajos de especialistas, informes de organismos oficiales y entrevistas a actores sociales de interés.

No obstante, las fuentes analizadas hasta el momento presentan una gran importancia debido a que posibilitan tener una noción general de los obstáculos que deben afrontar los productores, así como la forma en que los afectan los eventos hidrometeorológicos y las medidas que adoptan para paliar la situación. También brindan algunos lineamientos acerca de la manera en que actúan las autoridades estatales y las interacciones que se generan entre los distintos actores sociales. Asimismo, proporcionan información sobre los puntos en los que las autoridades y los medios hacen hincapié y aquellos que terminan relegados de las políticas públicas.

Al momento de relevar los artículos, se presentaron varias dificultades, entre ellas: a) las noticias se referían en su mayoría a zonas urbanas, principalmente a Posadas (capital provincial) y sus alrededores; b) los artículos presentaban escasa información acerca de los daños sufridos por los productores; c) en general los ámbitos rurales fueron menos tenidos en cuenta en las noticias locales, y en las nacionales no se registraron datos sobre la afectación de los productores familiares. Esto demuestra la falta de interés por visibilizar las afectaciones de los sectores rurales y de los productores familiares.

En el fichado de las notas de *El Territorio Misiones* también quedó en evidencia que el accionar de las autoridades provinciales manifiesta una gran ineficiencia y poca voluntad política de resolver la vulnerabilidad estructural que atraviesa a todas las familias de productores. Por lo general, la contribución pública se centra en el ofrecimiento de algunas herramientas, plásticos y postes para reparar unos pocos invernaderos, lo que habitualmente resulta insuficiente para abastecer las necesidades de los damnificados.

Varios de los eventos meteorológicos que se registran en la provincia causan cortes de rutas, que dejan incomunicada a la población. Además, producen el anegamiento de viviendas generando una numerosa cantidad de evacuados y la pérdida de producciones familiares. En conjunto y de manera aculada a través del tiempo, estos fenómenos afectan en forma negativa a los agricultores familiares y potencia la situación de vulnerabilidad ya existente, dado que nunca logran recuperarse del todo luego de algún desastre y siguen acarreando las consecuencias.

En este contexto se puede afirmar que las inundaciones en Misiones, junto con otros eventos hidrometeorológicos de mayor o menor envergadura se producen por eventos registrados periódicamente (fuertes lluvias y crecidas de ríos). Estos se terminan constituyéndose en desastres también habituales, definidos por la vulnerabilidad social, que amplía cada vez más el riesgo.

En este sentido, se considera que los daños que sufren los productores familiares de Misiones a causa de eventos hidrometeorológicos muchas pueden entenderse como casos de pequeños y medianos desastres, los cuales, al ser invisibilizados, usualmente no son vistos como una problemática urgente a resolver por parte de las autoridades provinciales. De esta manera, la amenaza que conllevan las condiciones climáticas de la provincia junto con la vulnerabilidad social que caracteriza a los productores familiares construye un escenario de alto riesgo, y los desastres ocurridos son, entonces, la manifestación concreta de los riesgos no manejados adecuadamente. En esta realidad se podría afirmar que la suma de las inacciones que ocurren cotidianamente en el territorio (en este caso Misiones), constituye un proceso que conduce a la generación del riesgo de inundaciones que no se anticipa al desastre que las mismas provocan.

Para concluir, se considera que es fundamental incorporar los aspectos o causas de fondo de la construcción de las situaciones de vulnerabilidad que definen el desastre, la inundación, ya que, en la actualidad, se reconoce el incremento del grado de exposición de las personas y los bienes, y muy poco avance sobre lo que es y cómo se podría reducir la vulnerabilidad, lo cual genera cada vez nuevos, más y mayores riesgos. Algunas medidas como el aumento de la asignación universal por hijo, por embarazo, por desempleo, las asignaciones familiares, entre otros, son temas de gran importancia para continuar en nuestra investigación.

REFERENCIAS

Aradas, M. E. y Golsberg, C. Tomo 2: Las Ferias de la Agricultura Familiar en la Argentina. Comercialización y financiamiento. *Colección Agricultura familiar*, INTA (2010).

Barros, V. y Perczyk, D. *Vulnerabilidad a cambios climáticos e hidrológicos*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable e Instituto Torcuato Di Tella, Buenos Aires (2006).

Craviotti, C. *Agricultura familiar en Latinoamérica: continuidades, transformaciones y controversias*, CICCUS, Buenos Aires (2014).

El Territorio Misiones. Hemeroteca de diarios de la Biblioteca del Congreso de la Nación Argentina. Años consultados: 2015, 2016 y 2017.

Obschatko, E. *Las explotaciones agropecuarias familiares en la República Argentina. Un análisis de los datos del Censo Nacional Agropecuario 2002*. Proinder, Buenos Aires (2009).

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres y Fundación OSSO. *DesInventar. Sendai Framework For Disaster Risk Reduction* (2017). Disponible en: https://db.desinventar.org/ (fecha de consulta: diciembre de 2019).

Wilches-Chaux, G. La vulnerabilidad global. Andrew Maskrey (comp.), *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina: La Red, Panamá, 11-44 (1993).

Wilches-Chaux, G. *Auge, Caída y Levantada de Felipe Pinillo Mecánico y Soldador o yo voy a correr el riesgo. Guía de La Red para la gestión local del riesgo*. La Red, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Lima (1998).

CARACTERIZACIÓN GRAVIMÉTRICA DE LA CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

Bahía M. E.[a], Longo M.[b] y Ravazzoli C. L.[cd]

[a]*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*
[b]*Consultora Geofísica independiente, ARGENTINA*
[c]*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísica, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[d]*CONICET, ARGENTINA*

e-mail: bahiamarcos.e@gmail.com

RESUMEN

La Cuenca del Golfo San Jorge se encuentra ubicada en la porción central de la Patagonia, entre los 45° y 47° de latitud Sur y entre los 66° y 71° de longitud Oeste. Es una cuenca elongada en dirección Este - Oeste que abarca las porciones Sur de la provincia de Chubut y Norte de la provincia de Santa Cruz y continúa al Este en la plataforma continental, cubriendo una superficie de aproximadamente 180.000 km2, de los cuales una tercera parte corresponde al sector de costa afuera. La aplicación de distintos métodos geofísicos permite obtener información de la distribución de las propiedades físicas y estructuras internas del área de estudio. Uno de los métodos geofísicos clásicamente utilizados en ambientes de cuenca es el método gravimétrico de exploración, que se basa en la medición de variaciones muy pequeñas del campo gravitatorio terrestre causadas por heterogeneidades laterales de densidad dentro del subsuelo. En este trabajo se describe el procesamiento y la integración de los datos gravimétricos terrestres provistos por la empresa YPF S.A., medidos sobre la Cuenca del Golfo San Jorge, junto con información geológica y de pozos de la zona. Esto permitió la construcción de modelos geofísicos confiables tanto 2D como 3D para las estructuras del subsuelo a largo de toda la cuenca, para lo cual se utilizó también una técnica de inversión estructural tridimensional. Los modelos obtenidos permitieron caracterizar la geometría del basamento a escala regional y la posición y profundidad de los depocentros sedimentarios más importantes de la cuenca, lo que no se había hecho hasta el momento.

Palabras Clave: Modelado e inversión gravimétrica, Cuenca del Golfo San Jorge, basamento, depocentros.

INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos geofísicos más utilizados en las cuencas sedimentarias, es el método gravimétrico de exploración, que se basa en la medición de desviaciones muy pequeñas en el campo gravitatorio terrestre causadas por heterogeneidades laterales de densidad dentro del subsuelo. En este trabajo, se presenta la aplicación de este método sobre un conjunto de datos gravimétricos terrestres en un sector de la Cuenca del Golfo San Jorge, una de las de mayor producción acumulada de petróleo de la Argentina.

Debido a la no unicidad de los campos potenciales, no existe un único modelo que ajuste los datos observados, con lo cual es fundamental el conocimiento de la geología y otras fuentes de información para disminuir la incertidumbre. En tal sentido, se hará uso de información de pozo y modelos estructurales para acotar las soluciones. El objetivo

principal del presente trabajo consiste en determinar la geometría del basamento de la Cuenca del Golfo San Jorge mediante la utilización de metodologías geofísicas de modelado e inversión en aquellos sectores donde existen datos gravimétricos disponibles en la base de datos de YPF S.A. Se propone, además, evaluar los principales depocentros mediante la elaboración de diversos perfiles y modelos gravimétricos 2D y 3D. Los métodos y resultados que se describen a continuación forman parte del trabajo desarrollado por Bahía (2020) y al cual el lector es referido para más detalles.

MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRAFÍA

La Cuenca del Golfo San Jorge se encuentra limitada en el Sur por el Macizo del Deseado, en el Norte por el Macizo Norpatagónico, en el Oeste por la Cordillera de los Andes y en el Este por el margen continental. Si bien muestra rasgos estructurales principales en sentido E-O, la faja plegada, que recibe el nombre de San Bernardo, se extiende en sentido N-S, dividiéndola en dos sectores: Este y Oeste (denominados también Sector Oriental y Flanco Occidental -u Oeste-, respectivamente). A su vez, el Sector Este se divide en Flanco Norte, Flanco Sur y Centro de Cuenca (ver Fig. 1). La porción costa afuera se considera una prolongación del Sector Oriental (Sylwan, 2001).

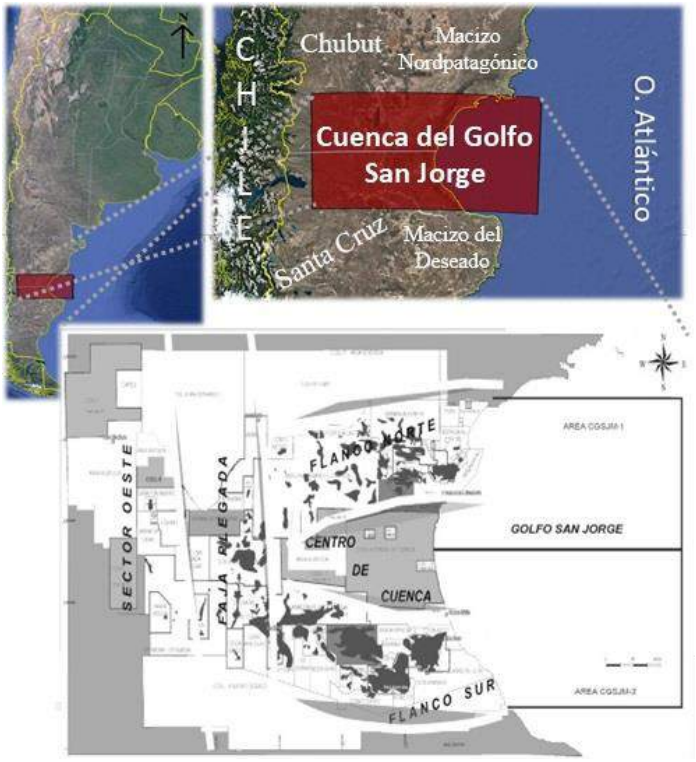


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Arriba: imagen satelital de la Cuenca del Golfo San Jorge. Abajo: sectores y flancos de la cuenca. Adaptado de Figari et al. (2002).

El basamento de esta cuenca puede ser descripto en dos términos, un "basamento Pre-Jurásico", compuesto por diversas litologías y edades, y un complejo más somero, denominado Complejo Volcánico Sedimentario (CVS), o "basamento técnico" (que denominaremos Megasecuencia 0). El basamento pre-Jurásico incluye el núcleo antiguo

de la Patagonia y está compuesto por un grupo heterogéneo de rocas de diversos orígenes y edades. En resumen, de manera cronológica algunos altos relativos están constituidos por: metamorfitas e intrusivos del Precámbrico - Paleozoico Inferior (y Paleozoico Superior, Figari et al. (1999)); gneises y migmatitas paleozoicas (Giampaoli, 2015); granitoides silúricos-devónicos; rocas metamórficas devónicas de bajo grado, como granitos y esquistos; unidades sedimentarias del Carbonífero-Pérmico; rocas ígneas pertenecientes al Pérmico y Triásico; pelitas, psamitas y piroclastitas del Triásico; sedimentitas y rocas volcaniclásticas, marinas y sus equivalentes continentales, así como tobas y calizas en el Jurásico Inferior (Lías). El CVS, perteneciente al Jurásico Superior y propuesto por Clavijo (1986), consiste principalmente en vulcanitas, volcaniclásticos y, en menor medida, sedimentitas del Jurásico Medio a Superior.

Se le asigna el nombre informal "Neocomiano" (Megasecuencia I) a aquellos depósitos de sedimentos que rellenan grábenes y hemigrábenes que comenzaron su desarrollo durante un episodio de extensión de la cuenca y en forma sintectónica con la megasecuencia anterior. Estos depósitos han sido divididos históricamente en dos secuencias, las que se corresponden parcialmente con las formaciones Pozo Anticlinal Aguada Bandera (principalmente pelítica) y Pozo Cerro Guadal (esencialmente arenosa), o equivalentes, y conforman el Gr. Las Heras. Estas unidades litoestratigráficas se definieron en el subsuelo de la Cuenca del Golfo San Jorge y carecen de exposiciones en la cuenca (Paredes, 2009).

En discordancia angular con el ciclo anterior, se depositan los niveles del Grupo Chubut que han sido incluidos dentro de la Megasecuencia II y están representados por las formaciones Pozo D-129, Mina del Carmen, Comodoro Rivadavia-Cañadón Seco y Yacimiento El Trébol-Meseta Espinosa; con sus respectivos equivalentes en el Sector Oeste, las formaciones Matasiete, Castillo, Bajo Barreal (Mb. Inferior) y Bajo Barreal (Mb. Superior). Durante la depositación de este ciclo se desarrolla una columna estratigráfica enteramente continental de varios miles de metros de espesor (Figari et al., 1999). La Formación Pozo D-129, la unidad más antigua de este ciclo, está compuesta por pelitas con una importante contribución de componentes piroclásticos y escasos carbonatos, los cuales se presentan principalmente en forma de oolitas. En efecto, estas litologías tienen un alto contenido orgánico, conformando la roca madre más importante para la generación de hidrocarburos en la cuenca.

Mediando suave discordancia angular, se incluyen dentro de la Megasecuencia III los depósitos del Cenozoico constituidos por una columna estratigráfica que oscila entre 500 y 1300 m. de espesor, y están representados por las formaciones Salamanca, Río Chico, Sarmiento, Patagonia, Santa Cruz y sus equivalentes laterales. Durante la depositación de estas unidades han existido diversos episodios extensivos (Navarrete et al., 2015) que, combinados a oscilaciones eustáticas, determinaron una historia de transgresiones y regresiones con vergencia atlántica. Es por ello que se componen, en líneas generales, de arcillas y tobas, con ocasionales intercalaciones de areniscas continentales, alternando con lenguas de depósitos marinos someros de transgresiones atlánticas episódicas.

PROCESAMIENTO DEL DATO GRAVIMÉTRICO

Se utilizaron 7435 mediciones de gravedad y de topografía de la base histórica de YPF S.A. La distribución espacial de estas estaciones es heterogénea, con mayor

cobertura (es decir, con menor espaciamiento entre estaciones) en el Sector Oeste de la cuenca, donde la separación entre estaciones es de 1 a 2 km, lo que implica una resolución espacial (longitud de onda mínima) de 2 a 4 km. La baja densidad de muestreo tanto en la faja corrida y plegada de San Bernardo como en el Sector Oriental de la cuenca se puede observar en la Fig. 2. El mapa de elevación del terreno fue obtenido a partir de las mediciones en superficie en cada estación (ver Fig. 2). Para el grillado de los datos se usó el algoritmo de mínima curvatura del programa Oasis montaj 9.5.1 (www.geosoft.com). Este método produce superficies suaves y trabaja bien en la regularización de puntos distribuidos en forma heterogénea (Briggs, 1974).

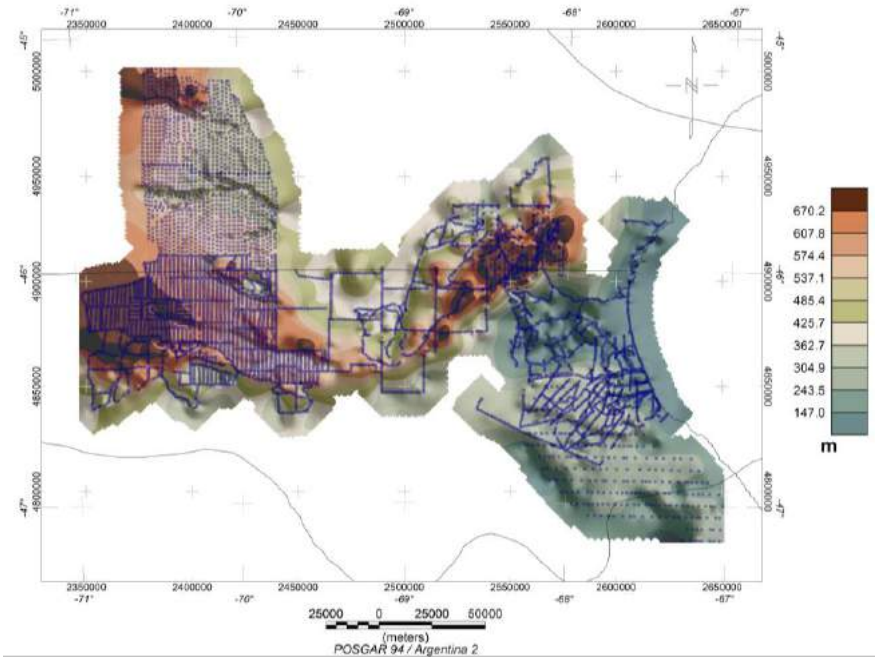


Figura 2. Mapa de elevación del terreno. Se observa mayor altura topográfica en el Sector Occidental de la cuenca, en cercanías a la cordillera andina, mientras que disminuye gradualmente hacia el Este a medida que nos acercamos a la plataforma continental. Además, se destaca una región de alto topográfico en el Flanco Norte. Puntos azules: datos gravimétricos regionales adquiridos por YPF S.A.

Las anomalías gravitatorias, de aire libre (AAL) y de Bouguer (AB), se calcularon utilizando las expresiones clásicas (Blakely, 1995, Hinze et al., 2013) con el software Oasis montaj 9.5.1. La densidad de reducción para la AB utilizada fue de 2,67 g/cm^3. La determinación de la corrección topográfica (CT) de cada estación de gravedad se realizó con el mismo software, que utiliza una combinación del método descripto por Nagy (1966) para la zona cercana e intermedia; y en la zona alejada, el descripto por Kane (1962). Pare ello se utilizó el mapa de elevación del terreno de la Fig. 2 y una densidad de 2.67 g/cm^3. En general, los valores obtenidos en la CT son pequeños (entre 0.008 y 0.05 mGal), alcanzando los 0.45 mGal, correspondiente a los mayores contrastes topográficos en la región del Flanco Norte. Por último, se realizó el cálculo de la Anomalía de Bouguer Completa (ABC), es decir, incluyendo la CT, como se muestra en la Fig. 3. En este caso, la anomalía es similar a la obtenida sin tener en cuenta la CT. Esto se debe a que la CT tiene valores pequeños y no influye de manera significativa en los cálculos de la anomalía de Bouguer.

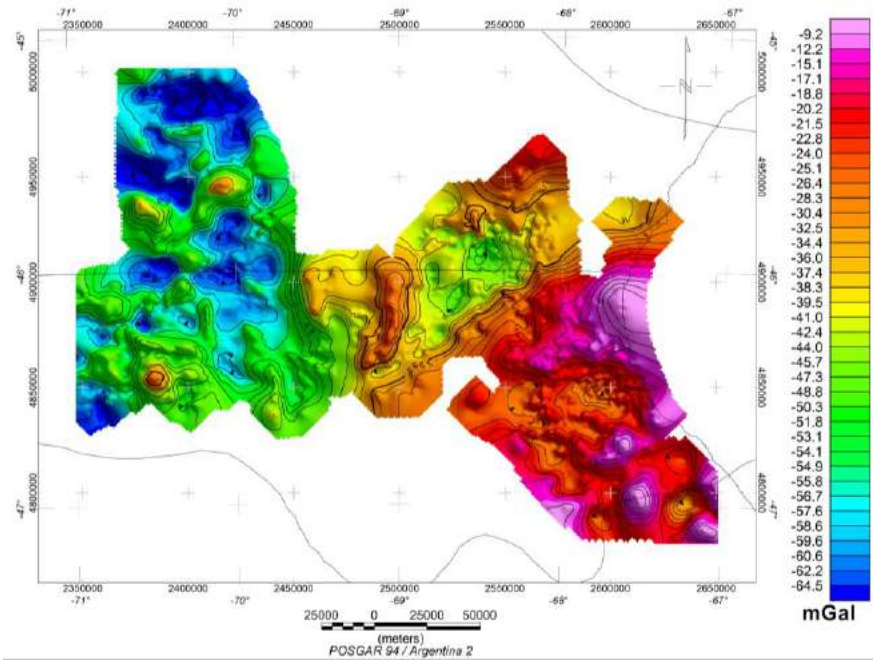


Figura 3. Mapa de Anomalía de Bouguer Completa, evaluada con un valor de densidad de 2.67 g/cm^3.

Separación de componentes regional - residual

El campo de anomalías de Bouguer (ver Fig. 3) contiene información proveniente de estructuras geológicas profundas (campo regional), y someras (campo residual o local) debido a estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes. La separación de estos efectos es indispensable para la interpretación de los mismos, ya que la componente regional podría enmascarar las respuestas producidas por las fuentes superficiales. Si bien la definición de componente regional y residual nunca podrá ser totalmente objetiva, la separación de ambos efectos dependerá del objetivo de la interpretación, de la calidad de los datos y del conocimiento de la geología. Entre los procesos de separación de campos regional – residual se pueden mencionar el de prolongación o continuación analítica, regresión y ajuste de superficies polinómicas, conocidas también como superficie de tendencia y filtrado por medio de la transformada de Fourier, entre otros.

En el presente trabajo se eligió un ajuste polinomial de primer orden. Se calculó por mínimos cuadrados la superficie de tendencia y se removió del mapa de la ABC la tendencia regional producida por fuentes profundas, obteniéndose de este modo la componente residual, como se muestra en la Fig. 4.

INTERPRETACIÓN Y MODELOS GRAVIMÉTRICOS

Con el fin de obtener información cuantitativa acerca de las fuentes causantes (geometría, dimensiones y profundidad) de las anomalías gravimétricas, se realizaron modelos 2D y 3D sobre la componente residual de Bouguer para los cuales se tuvieron en cuenta los valores de densidad medidos en perfiles de pozo y topes formacionales provistos por YPF S.A. Cuando el corte geológico se extiende sin variación en la dirección perpendicular, el proceso se describe como modelado bidimensional (2D), siendo una aproximación matemática muy útil y de bajo costo computacional.

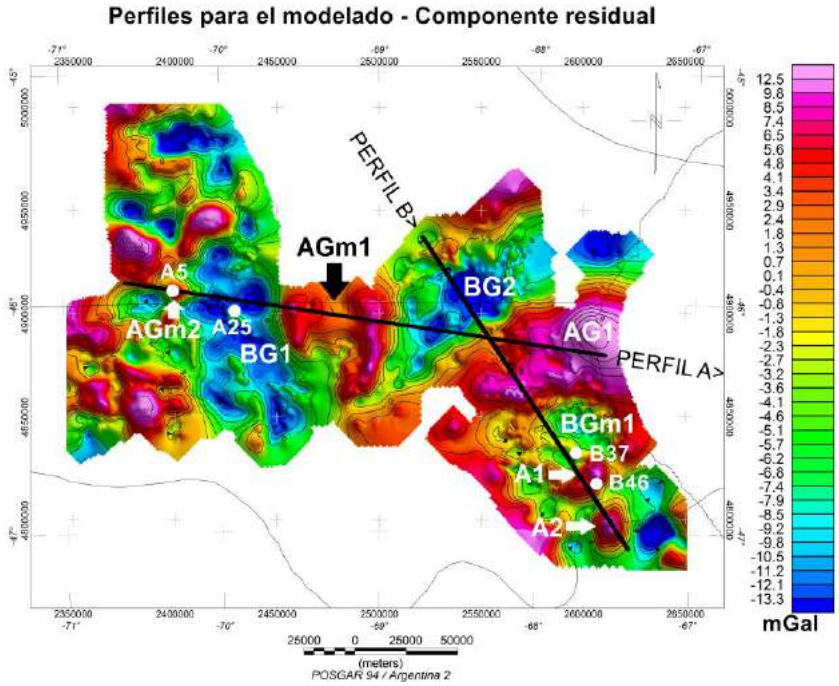


Figura 4. Componente residual de la ABC. Perfiles A y B realizados sobre el mapa de la componente residual y utilizados para la confección de los modelos. Círculos blancos: pozos de YPF S.A.

Si bien existen infinitas combinaciones de parámetros físicos y geométricos que pueden ajustar los datos observados, el conocimiento de la geología permite poner restricciones a los modelos y por lo tanto disminuir la incertidumbre. El detalle del modelo dependerá de la distribución espacial de los datos medidos y de la escala de trabajo. Los modelos se elaboraron con el programa GM-SYS (www.geosoft.com). Los cálculos están basados en las expresiones obtenidas por Talwani et al. (1959) y el algoritmo propuesto por Won y Bevis (1987).

Modelos 2D

Se realizaron dos modelos 2D (ver Fig. 5 y 6) en cada uno de los cuales se modeló una capa para el Cenozoico (o Megasecuencia III), una capa de sedimentos correspondientes al ciclo Chubutiano y al ciclo Neocomiano (Megasecuencias II y I, respectivamente), una capa que representa al CVS, otra correspondiente al Lías y, por último, una que hace referencia al basamento pre-Jurásico, que por simplicidad en lo que sigue lo llamaremos basamento (estas últimas tres capas conforman la Megasecuencia 0). La asignación de las densidades para las distintas capas de cada modelo se realizó en base al promedio de las medidas en pozos cercanos (Tabla 1).

Tabla 1. Referencias para los modelos 2D del subsuelo.

Capas	Colores	Densidades (g/cm^3)
Cenozoico		2.30
Neocomiano – Chubutiano		2.40
CVS		2.50
Lías		2.60
Basamento	xxxxx xxxxx xxxxx	2.76

Perfil A: Se extiende en dirección ONO-ESE con una longitud de aproximadamente 238 km, atravesando el Flanco Occidental, la faja corrida y plegada de San Bernardo y el Sector Oriental, específicamente el Flanco Norte y el Centro de Cuenca (ver Fig. 5). El perfil atraviesa los pozos A5 y A25.

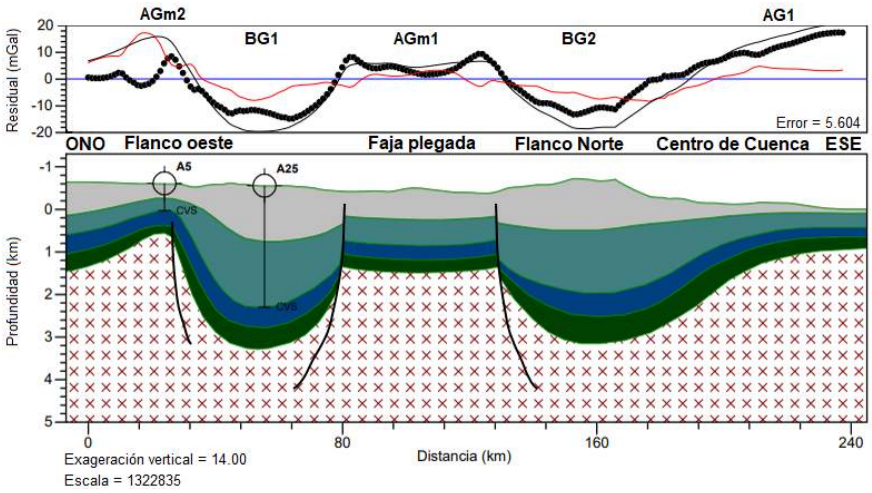


Figura 5. Modelo 2D realizado sobre el perfil A representado en la Fig. 4. Arriba: Anomalía observada (línea negra de puntos), calculada (línea gris continua) y curva de error (línea roja continua); abajo: modelo propuesto.

Perfil B: Se extiende en dirección NO-SE, con 188 km de longitud. Atraviesa los pozos B37 y B46 (ver Fig. 6) que contienen información de profundidad solo del basamento, por lo que las capas por encima de él fueron modeladas teniendo en cuenta la respuesta gravimétrica y la geología de la zona.

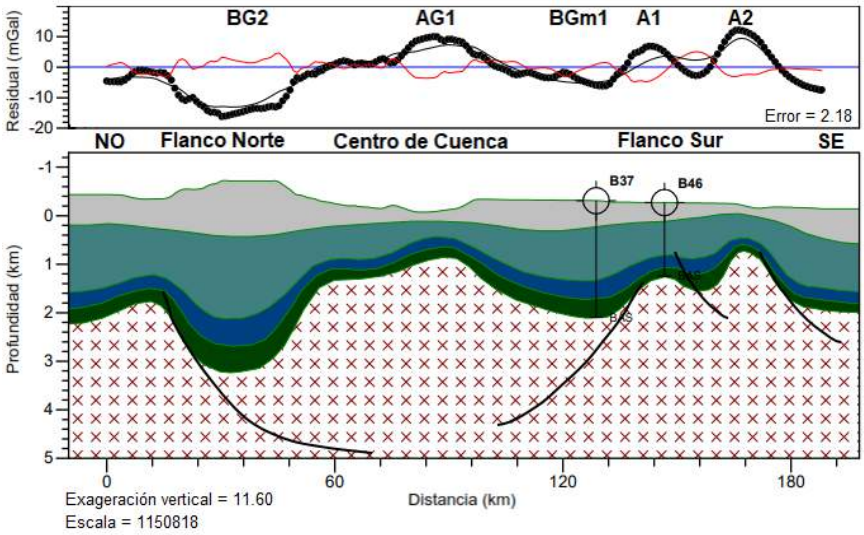


Figura 6. Modelo 2D realizado sobre el perfil B representado en la Figura 4. Arriba: Anomalía observada (línea negra de puntos), calculada (línea gris continua) y curva de error (línea roja continua); abajo: modelo propuesto.

Modelo 3D

Para realizar una inversión de datos, es necesario primero resolver el problema directo. De esta forma se obtiene un modelo geológico cuya respuesta geofísica se compara con los datos observados. Luego se resuelve el problema inverso mediante procedimientos iterativos hasta lograr un ajuste óptimo entre los datos observados y la respuesta del modelo.

El modelado 3D se realizó con una sola capa de sedimentos para estimar la profundidad y geometría del basamento pre-Jurásico (inversión estructural) asumiendo densidad constante de 2.76 g/cm^3. Este método consiste en la modificación de la elevación de la capa seleccionada para minimizar el desajuste por gravedad.

Para resolver el problema directo y realizar la inversión estructural se utilizó el programa GM-SYS3D (www.geosoft.com). Los cálculos para el modelado directo se basan en las técnicas en el dominio de la frecuencia publicadas por Parker (1972) y Blakely (1995). Las entradas al modelo son la superficie topográfica, que en este caso corresponde a las elevaciones del terreno obtenidas en cada estación de medición (ver Fig. 2), cuya densidad es de 2.3 g/cm^3 y la componente residual de la ABC.

Una vez obtenida la anomalía calculada en el problema directo, se la utilizó como entrada en el modelo inverso para obtener la superficie del basamento. Por lo general, se debe aplicar un cambio constante a la gravedad calculada para que coincidan con los datos observados. Es decir, se utiliza para normalizar una respuesta del modelo que tenga en cuenta las diferencias entre el valor medio observado y el valor medio calculado de la respuesta del modelo. Luego de aplicar esta corrección, se procedió a resolver el problema inverso. Los resultados estadísticos de la inversión se muestran en la Tabla 2.

El modelado 3D se realizó en el Flanco Sur (Fig. 7) y, desde el punto de vista gravimétrico, incluye el bajo gravimétrico que hemos denominado BGm1 y el alto o máximo A1, ambos definidos en la Fig. 4. La elección de estos rasgos gravimétricos a invertir se debe a la existencia de una gran cantidad de pozos con información de la profundidad del basamento, lo que permite verificar la eficacia de la inversión.

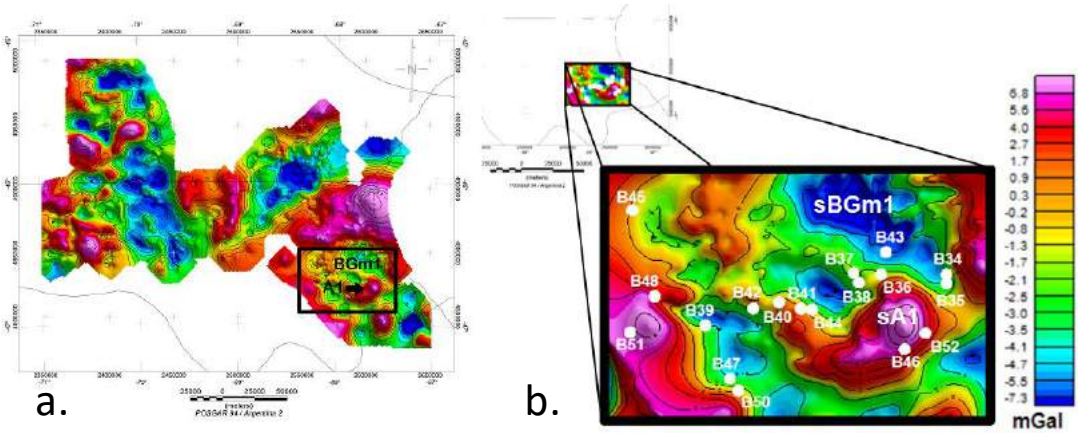


Figura 7. a: Región considerada para el modelo 3D (rectángulo negro) sobre la componente residual de la ABC. Se indican los rasgos BGm1 y la A1. b: Componente residual de la anomalía de Bouguer generada en el área de estudio. Los círculos blancos representan los pozos que alcanzan el tope del basamento. sA1 y sBGm1 son los rasgos correspondientes a la A1 y al BGm1, respectivamente.

Tabla 2. Resultados de la inversión.

Anomalías	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Observada	-10.168	11.683	-0.540	3.916
Calculada	-8.941	11.397	-0.509	3.809
Misfit	-2.378	3.446	0.000	0.403

En la Fig. 8 se puede ver una vista en planta y 3D de la profundidad del basamento pre-Jurásico. Los valores de profundidad varían desde alrededor de 1440 mbnmm (metros bajo nivel medio del mar), en la posición de la anomalía A1 de la Fig. 7 (P1), hasta los 2550 mbnmm aproximadamente, en la posición del BGm1 de la Fig. 7 (P2). Una característica que se destaca en la vista en planta (ver Fig. 8) son las orientaciones de los altos y bajos de basamento: los bajos azules claramente se disponen en dirección NO-SE, separados por altos de baja magnitud de igual orientación (indicados con líneas blancas), mientras que el alto P1 más significativo tiene una tendencia NE-SO (indicado con línea negra).

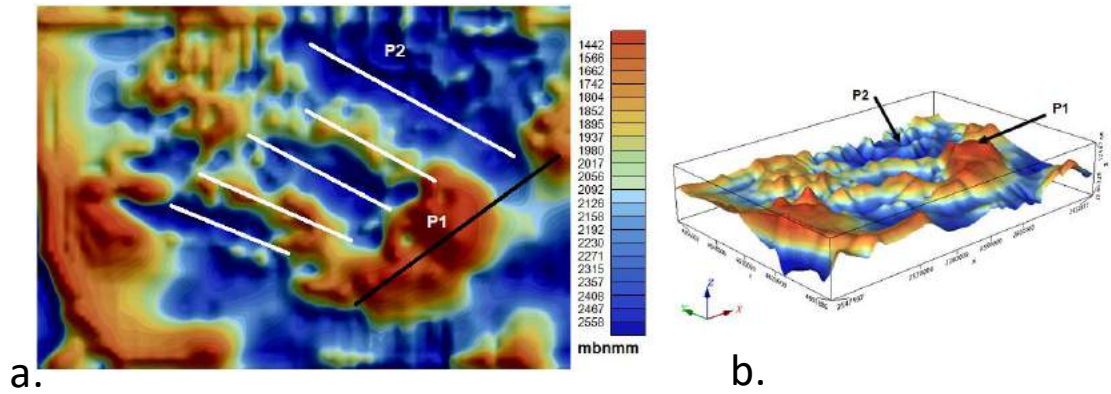


Figura 8. a: Vista en planta de la profundidad del basamento, resultado de la inversión gravimétrica 3D. b: Vista 3D del modelo realizado. Las flechas señalan la zona que corresponde a la A1 y al BGm1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Perfil A

En el Flanco Oeste en la zona del pozo A5, se encuentra el alto gravimétrico AGm2. El mismo se ve representado en el subsuelo por una disminución tanto del espesor sedimentario como de la profundidad del CVS (a juzgar por la información proveniente del pozo) y del basamento. En el sector del pozo A25, se observa el bajo gravimétrico que se extiende hasta la zona de la faja plegada, correspondiente al BG1. Este se interpreta mediante un bajo de basamento (hemigraben) que supera los 3200 m de profundidad. Asimismo, se modela un aumento de espesor en las secuencias de sinrift (Lías y CVS) en este sector y un máximo espesor de los depósitos Neocomianos-Chubutianos, que alcanzan los 1600 m, aproximadamente.

En la zona de la faja plegada de San Bernardo, existe un alto relativo (AGm1) modelado por una disminución de la profundidad del basamento, dando como resultado un bloque relativamente alto, limitado a ambos lados por fallas normales conjugadas (horst), resultado posiblemente de la tectónica extensional. De acuerdo con la

bibliografía (Figari et al. 1999, Sylwan, 2001, entre otros), en este sector existe una inversión tectónica positiva, es decir, fallas normales que se reactivan como inversas. Esta característica no se ve reflejada en el modelo, sino que lo que se observa es un bloque relativamente alto limitado a ambos lados por fallas normales conjugadas, pudiendo resultar de la tectónica extensional.

En el Sector Oriental se observa un aumento en el espesor de los sedimentos en el Flanco Norte y Centro de Cuenca (y gran profundidad del basamento) que generan el rasgo BG2 y posteriormente la disminución de los mismos. Un razonamiento teórico conceptual del mecanismo de inversión tectónica se podría aplicar por encima de este bajo gravimétrico, donde la topografía es muy elevada y, si se invirtiera dicho bajo, se lograría un relieve positivo en superficie.

Perfil B

Desde el punto de vista gravimétrico, atraviesa un bajo en el Flanco Norte, un alto en el Centro de Cuenca y un bajo menor y dos altos en el Flanco Sur, denominados, de acuerdo con la Fig. 4, BG2, AG1, BGm1, A1 y A2, respectivamente. En lo que respecta al bajo gravimétrico correspondiente al Flanco Norte, también evaluado en el modelo del Perfil A al Este de la faja plegada, se representa con una profundidad de basamento que alcanza los 3200 mbnmm y con gran espesor de los depósitos neocomianos-chubutianos. El BG2, de acuerdo al perfil A presenta una falla buzante hacia el E, por lo que se propone para este modelo, aunque no se vea una simetría tan clara, una falla buzante hacia el SE en ese sector.

Luego, el perfil atraviesa un sector en el Centro de Cuenca con alto valor gravimétrico, que se interpreta como una disminución tanto en la profundidad del basamento, como de las rocas del CVS y del Lías. Como consecuencia, disminuye el espesor de los depósitos Neocomianos y Chubutianos. Continuando hacia el Sur, el perfil cruza un bajo gravimétrico menor (BGm1) donde aumenta la profundidad del basamento y el espesor de relleno sedimentario. Tal es así que, la profundidad del basamento en el pozo B37, supera los 2000 mbnmm, correspondiéndose con los valores gravimétricos.

En el Flanco Sur se observan dos sectores con valores anómalos positivos, A1 y A2, (Fig. 4). La anomalía A1 se corresponde con un ascenso del basamento desde los 2097 mbnmm en el pozo B37 hasta alcanzar la profundidad de 1257 mbnmm. En el extremo SE del perfil, el valor gravimétrico disminuye, modelándose como un aumento progresivo en la profundidad del basamento. Se puede observar cierta disminución de los ciclos Neocomiano-Chubutiano en el Flanco Sur. Esto puede deberse a que las unidades, principalmente neocomianas, presentan su máximo espesor en el Flanco Occidental mientras que aumentan su dispersión y disminuyen bruscamente su espesor hacia el Este, más allá de la faja plegada. En el Sector Oriental presentan una gran dispersión, con rellenos de pocos cientos de metros y edades inciertas que marcan la marginalidad de toda esta área para la generación de espacio durante el proceso de rifting inicial (Figari et al., 1999). A su vez, el extremo SE del perfil se encuentra en la parte proximal de la cuenca, donde el espesor sedimentario disminuye.

Modelo 3D

Se comparó la profundidad del basamento obtenida de la inversión con la profundidad de cada uno de los 18 pozos del área. El error relativo es despreciable en 12

pozos, mientras que en los otros 6 el error es considerable, lo que será analizado en trabajos futuros.

Una característica que se puede destacar de la vista en planta (ver Fig. 8) son las orientaciones de los altos y bajos de basamento: los bajos azules claramente se disponen en dirección NO-SE, separados por altos de baja magnitud de igual orientación, mientras que el alto P1 más significativo tiene una tendencia NE-SO. Estos alineamientos podrían ser coherentes con las estructuras reconocidas en el Flanco Sur de la cuenca, como por ejemplo, las dos orientaciones mencionadas por Paredes et al. (2018).

Debido a que el polígono considerado para el modelo 3D es atravesado por el perfil B, se compararon los resultados del modelo 2D sobre el perfil y del modelo inverso 3D para el basamento. Se logró una buena correlación de la geometría y la profundidad del basamento, respetándose en ambos casos las disminuciones y los aumentos en la profundidad del mismo, y con diferencias que oscilan entre 200 y 400 metros, aproximadamente.

CONCLUSIONES

Se logró realizar de manera satisfactoria la reducción gravimétrica y la separación de componentes regional y residual de la Anomalía de Bouguer Completa. Con ello, se obtuvo una primera imagen de la geometría de la cuenca a escala regional y se observaron sus patrones anómalos más característicos. Por un lado, los principales bajos gravimétricos se localizan en amplias zonas del Flanco Occidental y Norte, mientras que los altos gravimétricos más destacados se encuentran en la faja corrida y plegada de San Bernardo, en el Centro de Cuenca y, aquellos más localizados, en el Flanco Occidental y Sur.

Los modelos 2D y 3D realizados permitieron determinar y modelar la geometría y profundidad del basamento de la Cuenca del Golfo San Jorge. Se reconocieron en total tres bajos gravimétricos, para los cuales se modeló e interpretó un aumento en la profundidad del basamento produciendo una gran cantidad de depocentros en la cuenca. Estos depocentros generaron el espacio suficiente para la acumulación de grandes espesores de depósitos sedimentarios, posiblemente revistiendo gran interés exploratorio. Asimismo, se distinguieron cinco altos gravimétricos asociados con una disminución en la profundidad del basamento y la consecuente reducción del paquete sedimentario.

Por todo lo expuesto se puede afirmar que el análisis e integración de los datos y de los resultados permitieron el entendimiento de la geometría, no solo del basamento, sino también de los estratos sedimentarios de la Cuenca del Golfo San Jorge, lo que es relevante desde el punto de vista geológico, geofísico y exploratorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a YPF S.A. por cedernos los datos para realizar este trabajo y permitir su publicación. A la empresa Seequent (ex Geosoft), en especial a la Sra. Andrea Pinheiro, por habernos facilitado una licencia educacional gratuita del software Oasis montaj, versión 9.5.1.

REFERENCIAS

Bahía, M. E. Determinación de la geometría del basamento de la Cuenca del Golfo San Jorge mediante datos gravimétricos. *Trabajo final, Universidad Nacional del Sur,* (2020). http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/106575

Briggs, J. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39, 39–48 (1974).

Blakely, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications. *Cambridge University Press.* (1995).

Clavijo, R. Estratigrafía del Cretácico Inferior, en el sector occidental de la Cuenca del Golfo San Jorge. *Boletín de Informaciones Petroleras, Buenos Aires,* 9: 15-32 (1986).

Figari, E., Strelkov, E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R., y Villar, H. Los Sistemas Petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis Estructural, Estratigrafía y Geoquímica. *Actas IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata,* I: 197237 (1999).

Figari, E. G., Strelkov, E., Cid de la Paz, M. S., Celaya, J., Laffitte, G., y Villar, H. Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. *Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate,* III: 571-601 (2002).

Giampaoli, P. Caracterización de sistemas de fallas extensionales utilizando perfiles y mapas de desplazamiento: ejemplos del Cretácico de la Cuenca del Golfo San Jorge. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (1): 107 - 119 (2015).

Hinze, W. J., B. von Frese, R. R., y Saad, A. H. Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. *Cambridge University Press* (2013).

Kane, M. F. A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics, vol.* XXXVII, *no*.4 (*August,* 1962), PP. 455-462 (1962).

Nagy, D. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics, vol.* XXXI, *no*.2 (*April,* 1966), PP. 362-371 (1966).

Navarrete, C., Gianni, G. M., y Folguera, A. Tectonic inversion events in the western San Jorge Gulf Basin from seismic, borehole and field data. *Journal of South American Earth Sciences* 64, 486-497. (2015).

Paredes, J. M. Sedimentary evolution of the Golfo San Jorge basin, Central Patagonia, Argentina. *En: Ibañez, L.M., Moyano, M.S., Aceñolaza, G.F. (Eds.), Argentinean Fluvial Basins: Ancient and Present Day Examples. Excursion Guide Book, 9th International Conference on Fluvial Sedimentology, Basin Analysis Series,* I: 187-275. *San Miguel de Tucumán* (2009).

Paredes, J. M., Aguiar, M., Ansa, A., Giordano, S., Ledesma, M., y Tejada, S. Inherited discontinuities and fault kinematics of a multiphase, noncolinear extensional setting: Subsurface observations from the South-Flank of the Golfo San Jorge basin, Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 81, 87-107 (2018).

Parker, R. L. The Rapid Calculation of Potential Anomalies. *Journal of the Royal Astronomical Society* 31, 447-455 (1972).

Sylwan, C. A. Geology of the Golfo San Jorge basin, Argentina. *Journal of Iberian Geology*, 27:123-157 (2001).

Talwani, M., Worzel, J. I., y Lindesman, M. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysics Research, vol.* 64 (1) (*January* 1959); P. 49-59 (1959).

Won, I. J. y Bevis, M. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics, vol*. 52 (2) (*February* 1987); P. 232-238 (1987).

IMPORTANCIA DE LA CREACION DEL PARQUE ESPELEOLOGICO POTI MALAL – MALARGÜE – MENDOZA

Benedetto C.A.

Federacion Argentina de Espeleología – FAdE, Malargüe, ARGENTINA

e-mail: carlos_benedetto@fade.org.ar

RESUMEN

Se describen las investigaciones espeleológicas realizadas en el Valle del Río Poti Malal, en cercanías de la futura represa hídrica Portezuelo del Viento, donde se han catastrado cavidades naturales en yesos del período Jurásico, los cuales afloran en la zona a ambos márgenes de dicho río, como asimismo del Río Grande. El Valle de Poti Malal está habitado por crianceros en la modalidad de trashumancia, aunque algunos de ellos intentan diversificar su economía con emprendimientos turísticos familiares, ello a pesar de no contar con servicios de electricidad, internet ni centros de salud. Se considera que es necesario poner en valor turístico no sólo el patrimonio espeleológico sino también el paleontológico del lugar, ya que se ha verificado la existencia de yacimientos de interés. Es viable instalar museos in situ en el Valle, como atractivos turísticos adicionales. Se propone la creación de un Parque administrado por los propios pobladores y asesorado por los espeleólogos autores de los descubrimientos de las cuevas más importantes a la fecha, con la asistencia de arqueólogos, paleontólogos, cientistas sociales, tomando como punto de partida el emprendimiento turístico ya habilitado por las autoridades, como asimismo de una ley específica de la Legislatura provincial

Palabras Clave: trashumancia, patrimonio espeleológico, museo in situ

INTRODUCCIÓN

En 1997 un poblador del Valle de Poti Malal, José Fernando Castro, reportó la existencia de una cueva en yesos del período Jurásico de grandes dimensiones a escasa distancia del puesto donde había nacido y siguen residiendo, aún hoy, sus padres y uno de sus hermanos (Castro, 1998). Bautizó a la cueva como San Agustín en homenaje a su abuelo, fundador del puesto Leiva y. Fue ese el primer hallazgo importante en cuevas formadas en yesos del Jurásico (Fm Auquilco) en ese Valle. De esta manera se enriqueció el Catastro Espeleológico Argentino (CEA) de la Federación Argentina de Espeleología (FAdE) hasta el punto de superar a la provincia de Neuquén en cuanto a cantidad de cuevas exploradas, registradas y denunciadas; así, la cantidad total de cavidades de las provincias de Mendoza y Neuquén representan el 90% del patrimonio espeleológico del país, al menos las hasta ahora conocidas. Con el avance de los estudios espeleológicos, surgió la necesidad de avanzar hacia la creación de un área protegida en Poti Malal (Castro, 2016).

ANTECEDENTES DE LOS TRABAJOS DE CAMPO EN POTI MALAL.

Las primeras cuevas fueron descubiertas en la margen derecha del arroyo Poti Malal, que desemboca en el Río Grande, a 20 kilómetros de la localidad de Las Loicas. Estas primeras exploraciones se realizaron antes de los trabajos de mensura de los puestos (Ley 6086) que aún hoy se mantienen activos y que albergan a crianceros cuyo medio de vida

es la ganadería trashumante. En los años subsiguientes se descubrieron más cavidades sobre la margen izquierda del Río Poti Malal, como asimismo se constató que se trata de un sistema hidrogeológico kárstico en yesos único en la provincia.
Las primeras referencias bibliográficas datan de 1998, 1999 y 2000 (Benedetto, 1998, 1999, 2000) (Castro y Cerda 2000), antes de la creación de la FAdE, en trabajos realizados por el Instituto Argentino de Investigaciones Espeleológicas (INAE), grupo fundador de la FAdE. En 2000 se descubrió la Cueva Federación (Mendoza) y se sumó a las exploraciones espeleológicas anuales el Mendip Caving Group (MCG) de Inglaterra. En 2003 la FAdE expuso estos descubrimientos en un simposio de Karstología en yeso en Italia (Benedetto, 2003) y luego en el Simposio Espeleológico del Medio Oriente en Beirut (Benedetto, 2006). En 2010 ya las cuevas en yeso de Malargüe ocupaban un lugar central en el Catastro Espeleológico Argentino (CEA), el cual inspiraría el Programa Provincial de Espeleología (PPE), Pensado en el marco del Plan de Gestión Ambiental provincial 2008-2012 para un relevamiento integral de las cavidades naturales según ley 5978, a cuyo cargo estuvo el autor de este trabajo (Benedetto 2010). Luego, en el V Congreso Argentino de Espeleología, el puestero y espeleólogo José Fernando Castro exponía, en el VI Congreso Argentino, su proyecto de hacer extensivo a todos los pobladores del valle un proyecto familiar que consistía en un camping desde donde se hacen cabalgatas y en las que las cavernas y sistemas kársticos configuran una parte inseparable del paisaje (Castro, 2016 op. cit.). Así fue como surgió la decisión de gestionar ante la Dirección de Recursos Naturales Renovables (DRNR) los permisos del caso para iniciar los estudios de base (topografía, georreferenciación de cuevas, hidrogeología), que fueron concedidos mediante Resolución 1485 del 17 de octubre de 2017, la que nos fue notificada a fines de febrero de 2018 y por lo tanto, ante la cercanía del otoño, debió esperar a febrero de 2019 para el inicio de su concreción formal.
Hasta la fecha se han relevado 11 cavidades en yeso, las cuales fueron resumidas por el MCG, en un croquis simplificado (Fig. 1)

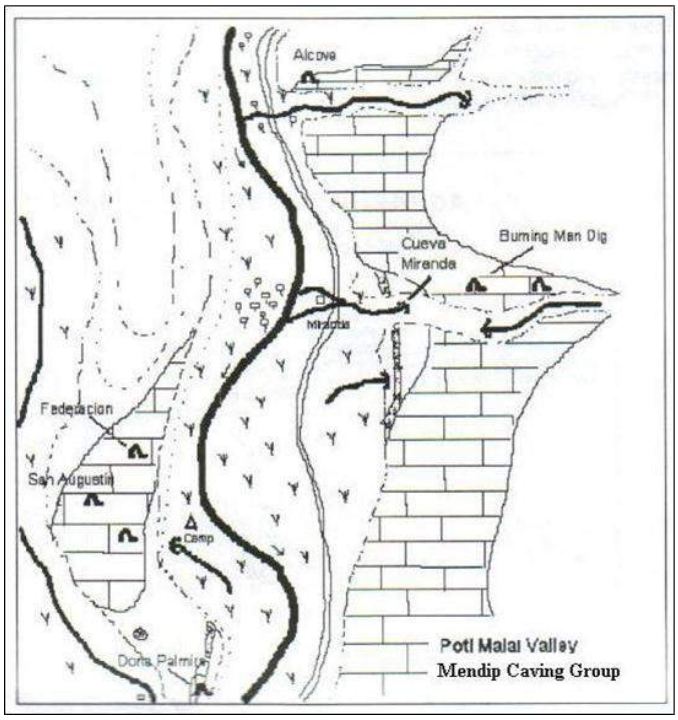


Fig. 1. primer croquis sobre la ubicación de las cuevas en el Valle de Poti Malal. La Cueva Doña Palmira se encuentra en el mismo macizo, pero el yeso allí no aflora, sino que está soterrado

Aquí puede apreciarse que tanto conjunto de cuevas Miranda-Burning Man Dig (en la margen izquierda del río Poti Malal), como asimismo el conjunto San Agustín-Federación, constituyen posibles sistemas hidrológicos hipogeos. La cueva Federación está actualmente seca, pero la cueva San Agustín contiene al menos cuatro lagos encadenados, según puede verse en la Fig. 2 y en https://youtu.be/2_Y6ON5Xr3o (2003) y https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=2n-32CzndVo&feature=youtu.be.

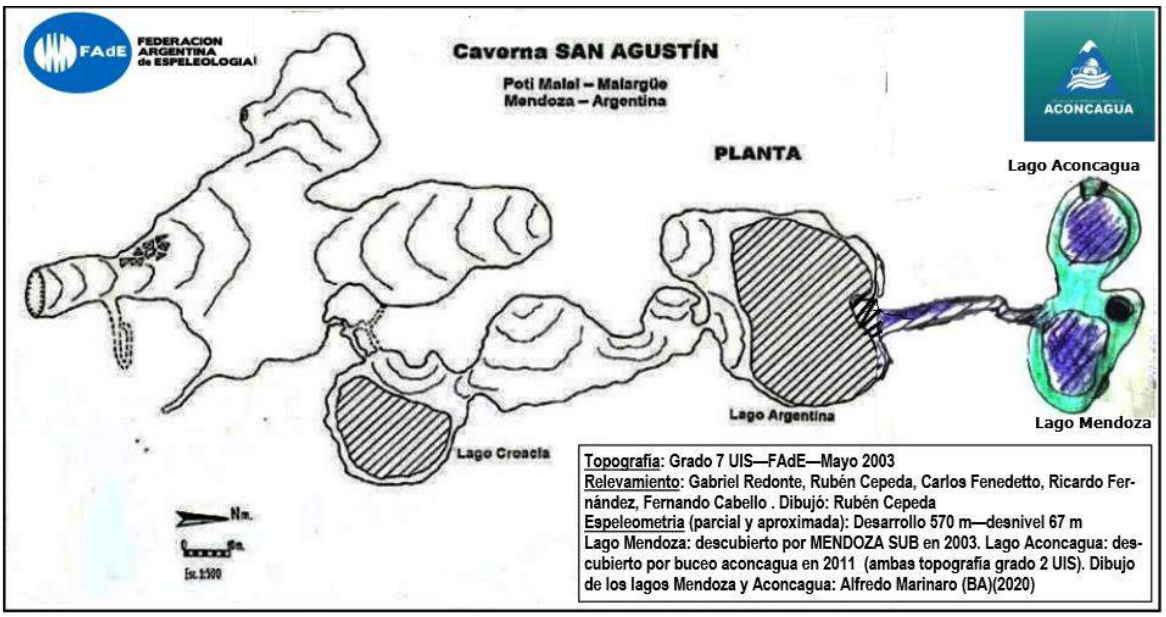


Fig. 2. Topografía de planta de Cueva San Agustín; pueden apreciarse con cuatro lagos, dos de ellos descubiertos el 2002 durante una expedición argentino-croata. El tercero (Lago Mendoza descubierto en 2003 por BUCEO ACONCAGUA. El cuarto (Aconcagua), descubierto por el mismo grupo en 2011

La Cueva Federación fue topografiada por el Mendip Caving Group conjuntamente con miembros de la FAdE (Fig. 3)

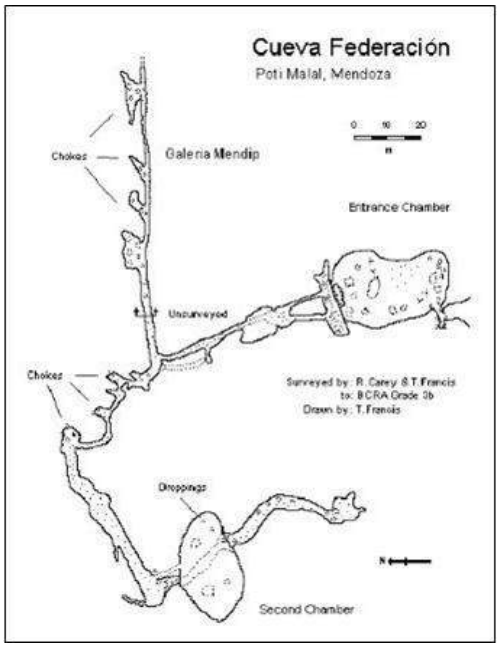


Fig. 3 – Topografía expeditiva de Cueva Federación

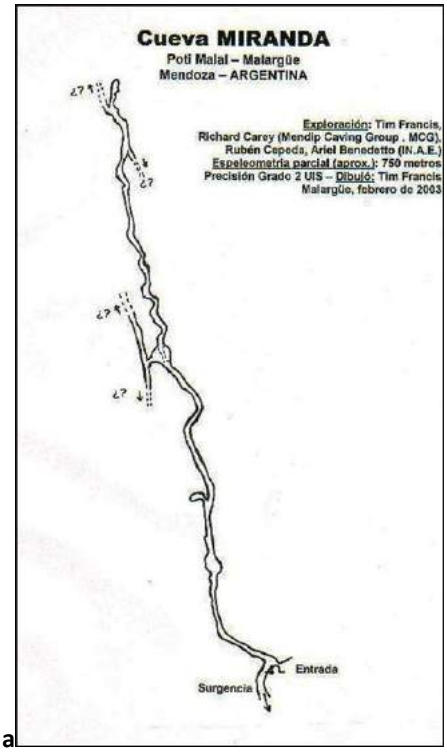
Las topografías se complementan con imágenes donde se señalan las cavidades San Agustín y Federación, y una foto del interior de la Cueva doña Palmira, en cuyo interior puede apreciarse el trabajo de disolución que ha llevado a cabo el agua (figs. 4. a y b.)

a 

b. 

Fig.4.a. El macizo que contiene a las cuevas San Agustín y Federación, desde la margen izquierda del arroyo Poti Malal. **b.** En Cueva Doña Palmira hay un pequeño espejo de agua y por encima del ese nivel se aprecian estas formas tubulares que indican la evolución hidrológica de la cueva. Fotos MCG 2002.

La cueva Miranda, por su parte, es la más extensa del valle (750 m de desarrollo) y la segunda cueva en yeso más extensa del país, además de ser donde emerge el agua del acuífero, o sea el punto de resurgencia de un posible sistema hidrogeológico. Además, la Cueva Miranda posee en su interior formaciones muy sólidas que permitirían la realización de dataciones y estudios paleoclimáticos y paleoambientales (ver Fig. 5.a y b.)

a 

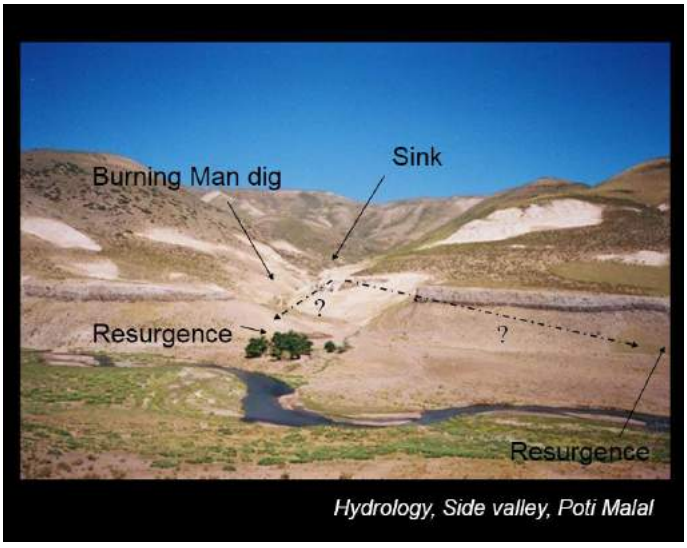
b 

Fig. 5.a. . Topografía expeditiva de Cueva Miranda. **b**. Ubicción de Cueva Miranda, Burning Man Dig y de los sitios de resurgencia de agua detectados. Foto MCG 2003

El interior de esta cueva, en tiempos de precipitaciones normales, es recorrido por un arroyo subterráneo que presumiblemente se alimenta de agua ingresada en cavidades no practicables a mayor altura, como muestra la Fig. 1. En su interior pueden observarse las distintas etapas de la formación de la misma, desde que el agua circuló de manera forzada por pequeños conductos, hasta que fue horadando los mismos hacia abajo, según muestra la Fig. 6. En las paredes pueden verse los estratos yesosos que podrían dar lugar a estudios de dataciones paleoambientales.



Fig. 6. El espeleólogo debe andar arrodillado sobre un río hipogeo que corre sobre clastos. La oquedad en el techo muestra la existencia pasada de un conducto forzado de agua. En las paredes pueden verse los estratos yesosos que podrían dar lugar a estudios de dataciones paleoambientales

En base a estas primeras exploraciones espeleológicas es posible que, en ambos potenciales sistemas o complejos, sería de suma importancia la realización de estudios de Hidrogeología Kárstica que permitan conocer cómo actúan los acuíferos subterráneos al interior de los macizos de yeso, habida cuenta de que los aparatos kársticos presentan geoformas epigeas clásicas, que podrían orientar más exploraciones y más descubrimientos de cavidades.
Los estudios de fauna de estas cavernas son aún incipientes, comprenden sólo observaciones aisladas de carcinofauna en una de las cavidades. A eso se agrega un informe de una expedición realizada en 2009, que no arrojó muchos resultados en cuanto a hallazgo de fauna endémica de cuevas, aunque con un listado importante de fauna ocasional (Mastropaolo, M. and Dreher, N. 2009)

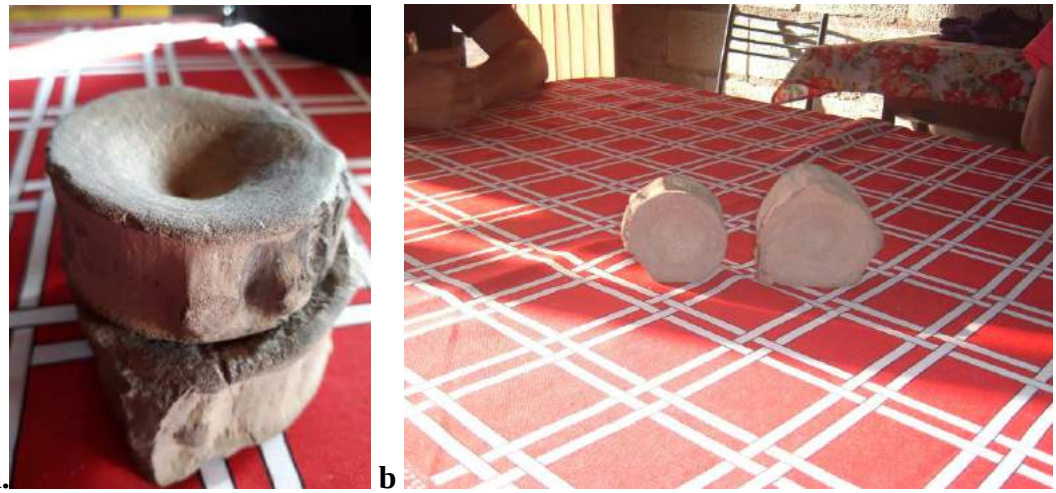
PROPUESTA DE CREACION DE UNA RESERVA

En el V Congreso Nacional de Espeleología, realizado en Malargüe en 2016, la Federación Argentina de Espeleología anunció la propuesta de crear, en el valle mencionado, un área protegida con criterio de autogestión por parte de los mismos puesteros conjuntamente con los espeleólogos nucleados en esa asociación.
El 17 de octubre de 2017 la Dirección de Recursos Naturales Renovables de la provincia (DRNR), a pedido de la Federación (expte. DRNR 345-D-16-77306), dictó la Resolución 1485/17, que autoriza la realización de las tareas de mensura y exploración para la creación de un área protegida, la cual puede extenderse, eventualmente, hasta la margen

izquierda de Río Grande y la localidad de Las Loicas), y hasta la zona del futuro dique Portezuelo del Viento

El 22 de abril de 2019, la Federación rindió el informe 2019/1919045 en la Delegación Malargüe de la DRNR, con datos de los últimos relevamientos de campo. En ese informe se advierte que, si bien uno de los puesteros del Valle ha establecido un emprendimiento turístico (camping) debidamente autorizado, se estarían produciendo en el Valle visitas turísticas clandestinas al interior de las cavernas, que ponen en riesgo la vida de los mismos visitantes, dado que las cavernas que allí se registraron están formadas en yesos microcristalinos muy inestables (FM. Auquilco, Jurásico). La familia que estableció el camping es la misma que descubrió la primera cueva (San Agustín).

En el informe se señala también "*la potencia de los yesos de los dos primeros puestos, entrando al Valle, sobre la margen izquierda del río, lugar en el que se requiere de una gran cantidad de exploradores a caballo, dada la magnitud de la yesera*" y que "*en las visitas a los puestos, observamos abundante material paleontológico, que incluye no sólo amonites, sino también, presuntamente, restos de grandes animales vertebrados; la riqueza paleontológica de ese puesto Miranda) invita a pensar en la necesidad de dar cuenta de esto a un equipo paleontológico, a los fines de crear un museo in situ, que podría ser una fuente de recursos económicos adicionales para los pobladores de esa zona*" (Figs. 7.a y 7-b)



a. **b**

Fig. 7.a y b. Parte de los fósiles que conservan los pobladores del Puesto Miranda

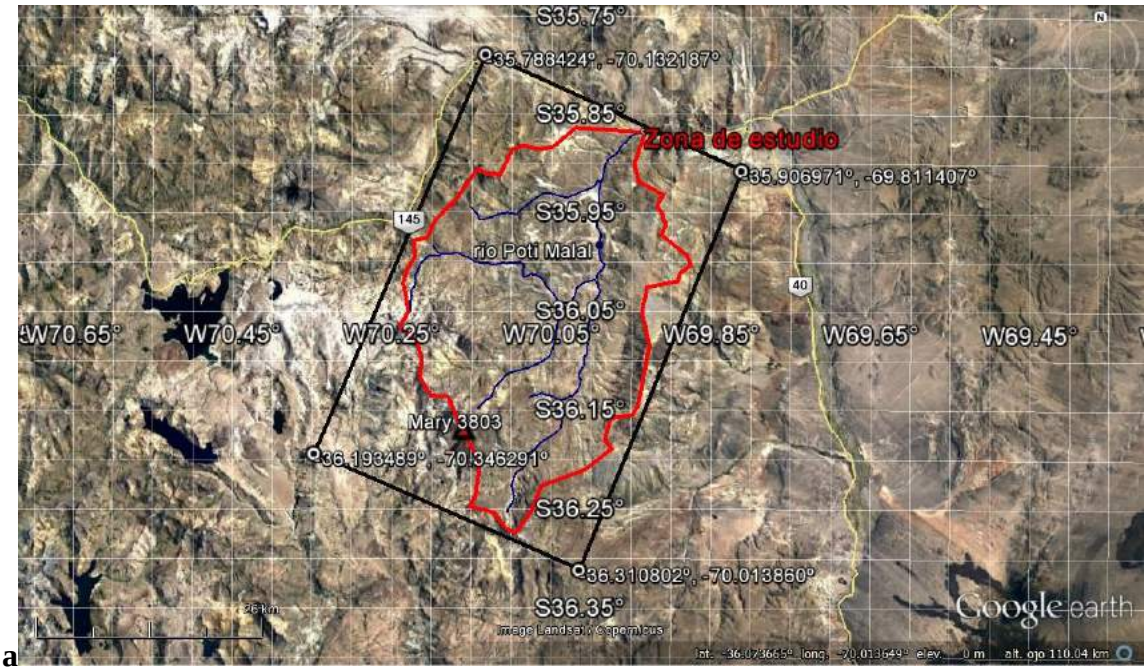
En el interior de la cueva Miranda, y dada la ausencia de agua, pudo observarse la existencia de pisolitas (perlas de las cavernas), antes nunca observadas en cuevas de yeso.

EL MARCO GENERAL DEL PROYECTO POTI MALAL

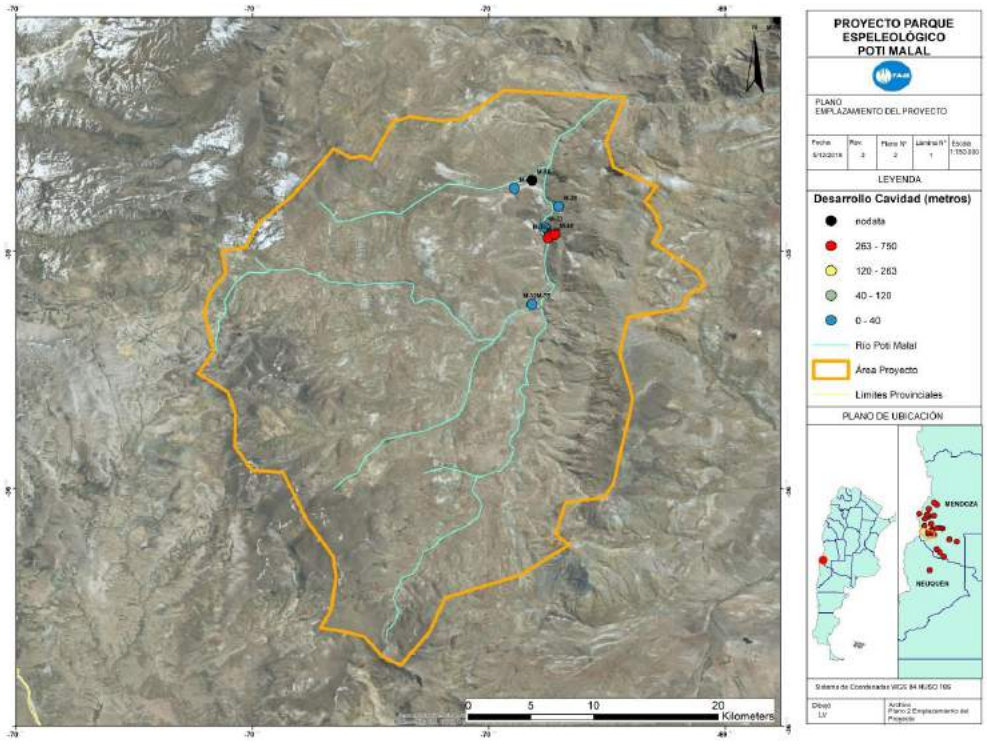
En función de este objetivo, la FAdE compiló los trabajos de campo realizados entre 1997 y 2017 y luego sobre las cartas geológicas del SEGEMAR, dividiendo la zona en cuatro subzonas correspondientes a la distribución de las 11 cavernas inventariadas hasta el momento, lo que obligó a modificar el catastro provincial presentado ante la DRNR en agosto de 2008.

Como se explica en el artículo publicado en http://piramideinformativa.com/2019/02/la-fade-descubrio-dos-nuevas-cavernas-en-el-valle-de-poti-malal-malargue-por-carlos-benedetto/, se trataría de una zona con un potencial kárstico muy interesante, con la existencia de acuíferos hipotéticamente interconectados. Cabe mencionar que los cambios

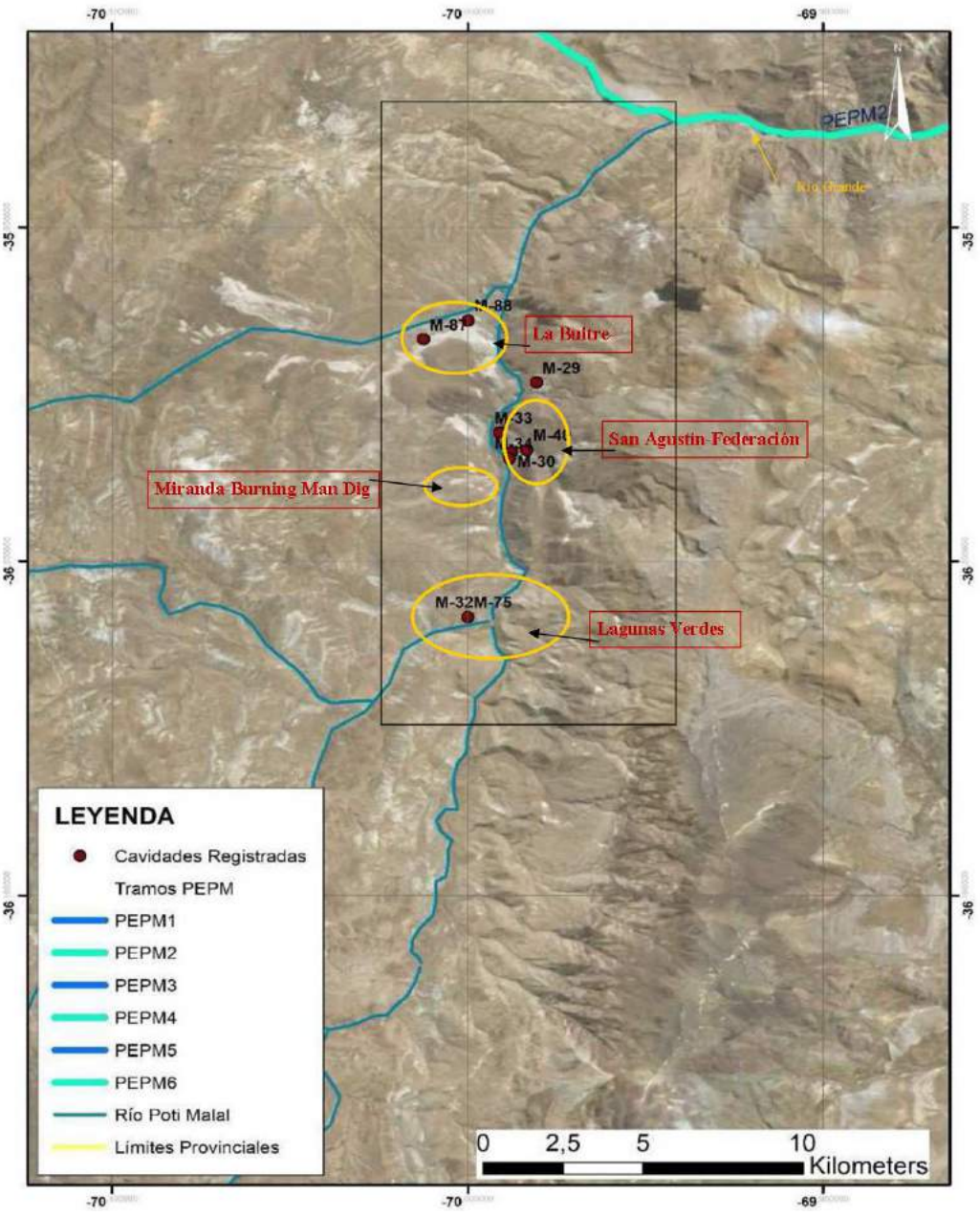
del paisaje por la prolongada sequía de la región y la propensión de las cavernas en yeso a evolucionar rápidamente fueron los motivos por los cuales en el mencionado artículo se deslizó un error al considerar como cavidades nuevas a las que serían las cuevas de Los Cangrejos y de La Gotera.
Los mapas elaborados para elevar la propuesta definitiva son las Figuras 8-a, 8-b y 8.c.



a



b



c.

Fig. 8-a. El área delimitada para el proyecto en rojo. Puede verse la potencia de los yesos, dentro y fuera de ella. **b.** El área delimitada (contorno amarillo) donde se destacan las cuevas más estudiadas hasta el presente. **c.** El valle de Poti Malal. Los dos óvalos amarillos del centro señalan los potenciales sistemas hidrogeológicos de Miranda y San Agustín. En el medio, el arroyo Poti Malal. El óvalo inferior corresponde a las cuevas vinculadas hidrológicamente con las Lagunas Verdes. El óvalo superior muestra a una zona potencialmente mucho más karstificada, pero casi inexplorada (sólo 4 cavidades catastradas a la fecha), en dirección a Portezuelo del Viento.

La tercera zona estudiada (Lagunas Verdes) se encuentra en el extremo sur del valle, que en la Figura 8.c se encuentra señalada con el óvalo amarillo inferior. En el lugar hay dos lagunas epigeas rodeadas de yesos en los que se descubrieron pequeñas cavidades que interactúan hidrológicamente con las lagunas (Fig. 9)



Fig.9. Lagunas Verdes. Foto de Iair Berenstein, FAdE 2019

Las topografías de las cavernas fueron realizadas en el año 2001 y son sumamente rudimentarias. La Cueva de los Cangrejos es una salida de agua y la Cueva de la Gotera es un talud descendente hacia un posible sifón. Ambas estarían conectadas con las Lagunas. (figs. 10 a., b., c. d.)

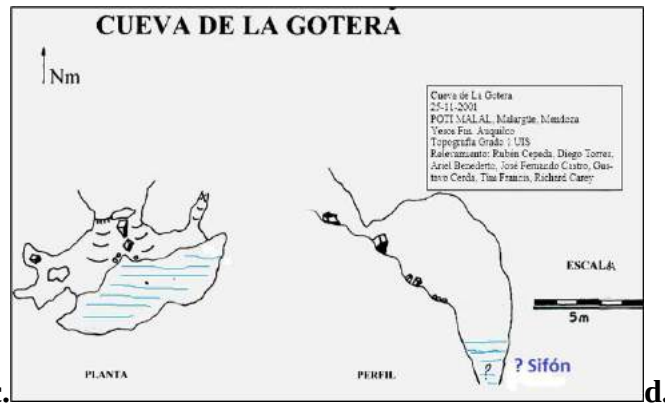
a



b.



c.



d.



Fig. 10. a. Topografía rudimentaria Cueva de los Cangrejos. **b.** Fotos de la entrada a Cueva de los Cangrejos. **c.** Topografía rudimentaria de la Cueva de la Gotera. D. Foto de Cueva de La Gotera

La cuarta zona, óvalo superior en la figura 2.c, es la desembocadura de un arroyo hipogeo de muy corto recorrido. Se hicieron exploraciones (2015 y 2019) en la parte alta del macizo y hasta el momento se catastraron cuatro cavidades: La Buitrera I, II, III y IV. (Ver Figura 11)

a.  b. 

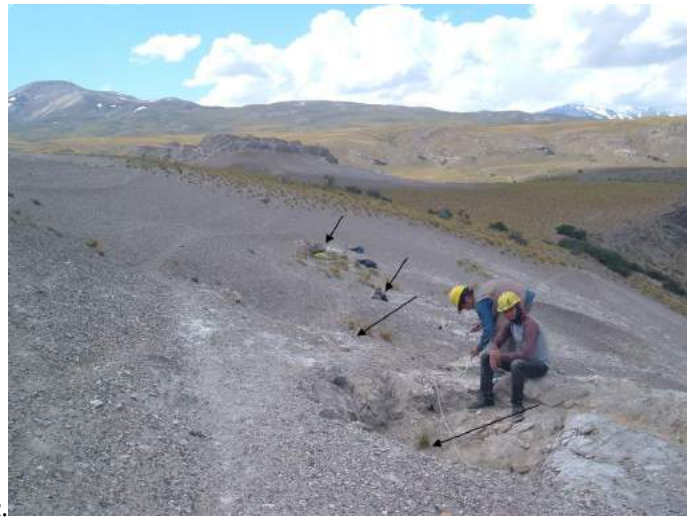
c.  d 

Fig. 11. A. interior de la Cueva La Buitrera II. Se observaron diaclasamientos y estalagmitas de guano antiguo, b. espeleotemas de calcita en la misma cavidad. c. En la meseta al tope del macizo, pueden observarse, alineados, varios puntos de absorción de agua. d. Desde el mismo punto de observación, pero hacia la derecha (Este), se ve el punto de emisión de agua, activo incluso en tiempos de sequía, lo que denunciaría la presencia de un acuífero

CONLUSIONES PRELIMINARES

En sus conclusiones preliminares, se señala que

- Existirían cuatro zonas de interés hidrogeológico en el Valle, uno de los cuales, a la entrada del mismo, casi totalmente inexplorada
- La FAdE considera el necesario imbricamiento de la legalidad formal de nuestro sistema republicano con los códigos ancestrales de los pobladores del valle, y el conocimiento de los conflictos e intereses. Se detectaron también conflictos interfamiliares por el problema de la "posesión" de la tierra, lo que requeriría de la asistencia de trabajadores sociales para restaurar el tejido social así dañado, como asimismo un mayor compromiso del Programa de Arraigo (Ley 6086). La mensura

de las tierras es percibida por los pobladores como sinónino de propiedad, y hacen extensivo ese concepto a las cavidades naturales, a pesar de que la ley 5978 las define como bienes comunes.

- De las cuevas hasta ahora exploradas y catastradas, Miranda y Doña Palmira serían un buen espacio para estudios de reconstrucciones paleoclimáticas y paleoambientales a partir de profundizar estudios de hidrogeología kárstica. En Cueva San Agustín podrían continuarse los estudios de velocidad de disolución de los yesos en los lagos hipogeos hasta ahora descubiertos. Hasta el momento el Valle de Poti Malal es el único en el país donde se sospecha la existencia de sistemas de cavernas en yeso hidrológicamente interconectadas.
- En los alrededores de las cavernas descubiertas hay yacimientos paleontológicos de interés, que podrían generar la instalación de museos in situ, lo que hace pensar en las potencialidades para crear un polo de desarrollo turístico-científico
- Hasta el momento el Valle de Poti Malal es el único en el país donde se sospecha la existencia de sistemas de cavernas hidrológicamente interconectadas, en yeso
- La zona de las Lagunas Verdes sería, en principio, la de mayor potencialidad biológica
- Las cuevas mencionadas en este trabajo deberían ser consideradas intangibles para el turismo hipogeo y exclusivas para actividades científicas
- La FAdE cumplió parcialmente el objetivo del Proyecto, en tanto no se pudieron relevar las yeseras camino a Las Loicas sobre la margen derecha del Río Grande, ni tampoco las yeseras en la margen izquierda, aunque se establecieron acuerdos con los pobladores para exploraciones epigeas futuras.

METAS A FUTURO

Restan tareas de relevamiento de las yeseras camino a Las Loicas, sobre ambas márgenes del río Grande, con ese objetivo de iniciaron gestiones para continuar los trabajos autorizados mediantes Resolución DRNR 1484/2017, a fin de:

1) Establecer conexión hidrológica entre las distintas cuevas mencionadas, a ambos márgenes del río Poti Malal

2) Desarrollar exploraciones sobre las márgenes derecha e izquierda del Río Grande. Estudio de factibilidad de extender hacia allí la futura área protegida, o crear una segunda.

3) Topografiar, georreferenciar y catastrar nuevas cuevas

4) Relevar, en todas, las potencialidades biológicas, mineralógicas, paleontológicas, hidrogeológicas y arqueológicas, con participación de instituciones científicas

5) Relevar las relaciones simbólicas y espirituales de los pobladores del Valle con el paisaje epigeo e hipogeo, como asimismo contribuir al fortalecimiento del tejido social

6) Evaluar los posibles circuitos turísticos epigeos en base a la experiencia del Puesto Leiva (flía. Castro), a fin de desalentar el turismo clandestino o las actividades espeleológicas deportivas no autorizadas.

7) Evaluar las necesidades de infraestructura para los habitantes del Valle: electricidad, internet, telefonía, caminos en buen estado, centro de salud

8) Colaborar con el Programa de Arraigo del Puestero (Ley provincial 6086) en todo lo que fuere necesario para regularizar la situación dominial de los habitantes del Valle en particular y de toda la región en general.

El diputado provincial Gustavo Majstruk dio inicio a un expediente legislativo para la creación de un área protegida autogestionaria, Expte 78180 del 16-7-2020, Cámara de Diputados de la Provincia de Mendoza. Se trata de una propuesta en la que deberán intervenir muchas disciplinas científicas no sólo duras, sino también y fundamentalmente sociales, lo que constituye un desafío: una reserva que, en los hechos, funcionaría como un gran *museo in situ*.

AGRADECIMIENTO

A la Dra. Marcela Alejandra Peralta (Fund. Miguel Lillo, Tucumán), por su permanente acompañamiento y por la lectura crítica de este escrito

REFERENCIAS

Benedetto, C.A. San Agustín: una gran cavidad en yeso en el Paraje Poti Malal, Malargüe, Mendoza, Argentina. *Memorias del V Encuentro Argentino de Espeleología. Las Lajas (Neuquén)*, 43-47. (1998)

Benedetto, C.A. La Caverna de San Agustín, Argentina. *Revista El Guácharo. Caracas, Venezuela, 45,* 37-42. SVE. (1999)

Benedetto, C.A. La caverne de Saint-Agustín. *Regards,* Liege, Bélgica 38, 32-33 (2000)

Benedetto, C.A. - Gypsum karstic areas in Argentina: a necessary update. *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development. Bolonia – Italia* (2003).

Benedetto, C.A. Estado actual del conocimiento del valle de Poti Malal (Malargüe, Mendoza) y de su carso yesoso. *II Congreso Nacional Argentino de Espeleología. (*2004)

Benedetto, C.A. New Gypsum caves in North Patagonia (Argentina). *2nd. Middle East Speleology Symposium, American University of Beirut* (2006)

Benedetto, C.A. - Un programa provincial que busca superar los problemas estructurales de toda la espeleología Argentina. *Espeleotema 21*, *Sociedad Brasileña de Espeleología*, www.sbe.com.br/espeleo-tema.asp, www.sbe.com.br/espeleo-tema_v21_n1.asp (2010)

Casal, J.M. Determinación de la velocidad de crecimiento del karst en yeso de Poti Malal, Malargüe, Mendoza, Argentina. *Argentina Subterránea 31*, 7 (2012)

Castro J. F. and Cerda G. Descubrimiento de dos nuevas pequeñas cavidades en el carso de Poti Malal, Malargüe, Mendoza, Argentina. *I Congreso Nacional Argentino de Espeleología. Revista Spelaion* 7, 29-34 (2010)

Castro, J. F. Biografía de Agustín Castro, historia del descubrimiento de la cueva que lleva su nombre y formación del Grupo Espeleológico Poti Malal – *Argentina Subterránea 40, 41-46.* (2016)

Dirección de Recursos Naturales Renovables. Resolución 1485. https://issuu.com/fade3/docs/informe_drnr_res._1485-17 (2017)

Majstruk, G. GRM.L. Parque Espeleológico Poti Malal. H. Cámara de Diputados de Mendoza, expte. 78180. *https://www.hcdmza.gob.ar/site/consulta/ y https://piramideinformativa.com/wp-content/uploads/2020/09/Expte-78180-Poti-Malal. Legislatura.pdf* (2020)

Mastropaolo, M. y Dreher, N. Informe de observaciones sobre actividad biológica en Caverna San Agustín, Poti Malal, Mendoza. *Argentina Subterránea 8, 10-11* (2009)

Mendip Caving Group, 2001. "News Nº 298", June. Bristol.

Mendip Caving Group, 2002. "News Nº 306", July. Bristol.

METODOLOGÍA DE RELEVAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA APLICADA A LA CIUDAD DE SAN RAFAEL (MENDOZA, ARGENTINA)

Biondi M. L.[a], Negreira, G. A.[b], Crisnejos M. L.[c], Martínez G. M.[c], Guerci A.[bd], Soengas C. J.[a], Villarroel I. M.[ac] y Reviglio H. A.[a]

[a]*Facultad Regional San Rafael, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[b]*Museo de Historia Natural de San Rafael, ARGENTINA*
[c]*Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos, Municipalidad de San Rafael, ARGENTINA*
[d]*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*

e-mail: lbiondi@frsr.utn.edu.ar

RESUMEN

La infraestructura verde urbana tiene una importante incidencia en la calidad de vida de la población y en la sostenibilidad de las ciudades. Esta afirmación se sustenta considerando que los espacios verdes y el arbolado público disminuyen la intensidad de las islas de calor, colaboran en la fijación de carbono, reducen la contaminación del aire, promueven la regulación de la luz y del viento, constituyen el hábitat de fauna local y aportan atractivo paisajístico al espacio urbano. A su vez, el estado inadecuado de la infraestructura verde puede ocasionar problemáticas asociadas al riesgo de caída de los ejemplares, como interferencia con otros servicios públicos, afectación a propiedades y pérdida de vidas humanas. Teniendo en cuenta lo mencionado, se considera imprescindible la planificación estratégica y la gestión integral de la infraestructura verde urbana como parte del ordenamiento territorial de la ciudad de San Rafael (Mendoza, Argentina). El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una metodología de relevamiento que permita efectuar un diagnóstico del arbolado del área de estudio mencionada, a partir de la colaboración interinstitucional entre organismos científico-tecnológicos y organismos gubernamentales. El desarrollo incluye la confección de la ficha de tangibles a observar, el diseño de un software para la recopilación de datos en campo, la diagramación del barrido territorial, la capacitación del personal interviniente, el trabajo de campo propiamente dicho y el procesamiento de los datos en gabinete a partir de un SIG. Entre las variables a relevar de cada ejemplar se consideran: georreferenciación, especie, altura, perímetro del tronco, inclinación, estado vegetativo y presencia de plagas. Las herramientas a emplear incluyen: instrumentos de medición, guía de especies arbóreas, imágenes satelitales y bases de datos. Con la iniciativa se espera constituir una herramienta de diagnóstico en tiempo real, sistematizada y fácilmente actualizable, que sirva como base para la toma de decisiones.

Palabras Clave: infraestructura verde, arbolado público, relevamiento, planificación urbana, ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

Conceptualmente, la infraestructura verde urbana está conformada por el arbolado público, las plazas, los parques y los espacios verdes en general, que en conjunto constituyen una red interconectada dentro de las ciudades, que conserva funciones y valores de los ecosistemas naturales (Vásquez A., 2016).

La existencia del arbolado público es el resultado de la plantación de especies forestales a lo largo de canales, calles, avenidas y espacios verdes en distintos períodos históricos, es decir que el arbolado urbano es “una forma de vegetación claramente antropogénica,

que debe su sobrevivencia, forma, estructura y estado de salud, a una compleja mezcla de factores socio-culturales y ambientales" (Rodríguez Bormioli N. et al, 2017).

La presencia de forestales en áreas urbanas responde a necesidades relacionadas con las características climáticas, socioculturales y económicas de las ciudades. Entre sus múltiples beneficios se pueden mencionar: la disminución de la intensidad de las islas de calor, la absorción de gases de efecto invernadero, la reducción de la contaminación del aire, la producción de oxígeno, la proporción de sombra, la regulación de la humedad ambiental, la disminución de ruidos, la atenuación de vientos, la colaboración en la gestión del agua pluvial, la reducción de la erosión de los suelos, el aumento de la biodiversidad y el aporte de atractivo paisajístico al espacio urbano (Unión Europea, 2014).

Sin embargo, el estado inadecuado del arbolado urbano puede ocasionar problemáticas asociadas al riesgo de caída de los ejemplares, como: interferencias con otros servicios públicos, afectación a propiedades y pérdida de vidas humanas.

De todo esto se desprende que la planificación ambiental asociada a la infraestructura verde urbana es un aspecto relevante del desarrollo territorial, con influencia en la sustentabilidad de las ciudades (Martinez C. F. et al, 2014). Teniendo en cuenta lo mencionado, se considera imprescindible la gestión integral del arbolado público, afirmación que se sustenta en vastos antecedentes, tanto nacionales (Municipalidad de Posadas, 2012) (Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2002) como internacionales (Ajuntament de Barcelona, 2014) (Vargas M. A. y Balmaceda N., 2011) (Quiroz Benítez D. E., 2018) (Moreno O. et al, 2014).

En la provincia de Mendoza (Argentina), la presencia masiva de árboles en los núcleos urbanos (relación árbol/habitante = 0,93 en 2011) ha hecho de una región desértica natural, un lugar apto para el desarrollo de la vida humana (Martinez C. F., 2019). Esta intensa arborización, resultado de la plantación de especies forestales a lo largo del tiempo, les confiere a los núcleos urbanos de Mendoza un carácter único en la región y en el mundo y, junto con la red de riego, es el recurso natural que sustenta el modelo urbanístico desarrollado (Castellanos P., 2018). Dentro de la provincia, el área de estudio del presente trabajo es la ciudad de San Rafael en la provincia de Mendoza, Argentina (ver Fig. 1).

Desde el punto de vista normativo en la región, la Ley Provincial Nº 7.874/08 establece el "Régimen de Preservación y Control del Arbolado Público" y tiene por objeto proteger y mejorar el medio ambiente de la Provincia de Mendoza a través de la implementación de políticas ambientales permanentes, racionales y sustentables para el control, conservación y preservación del arbolado público. Al mismo tiempo la ley declara al Sistema de Arbolado Público como patrimonio natural y cultural de la Provincia de Mendoza y se le otorga el carácter de servicio público prioritario (Legislatura de Mendoza, 2008).

En el plano local, son dos las ordenanzas que protegen a los forestales: en primer lugar, la Ordenanza Municipal Nº 9.814, del Arbolado Público, la cual está sujeta a las facultades y disposiciones que establece la Ley Nº 7.874, siendo el municipio uno de los organismos competentes en el control, preservación y desarrollo del Arbolado Público en su jurisdicción (Honorable Concejo Deliberante de San Rafael, 2010); en segundo lugar, la Ordenanza Nº 9815, que en su Artículo 1º crea, en el ámbito de la Municipalidad de

San Rafael, el "Consejo Departamental de Defensa del Arbolado Público" (Honorable Concejo Deliberante de San Rafael, 2010).

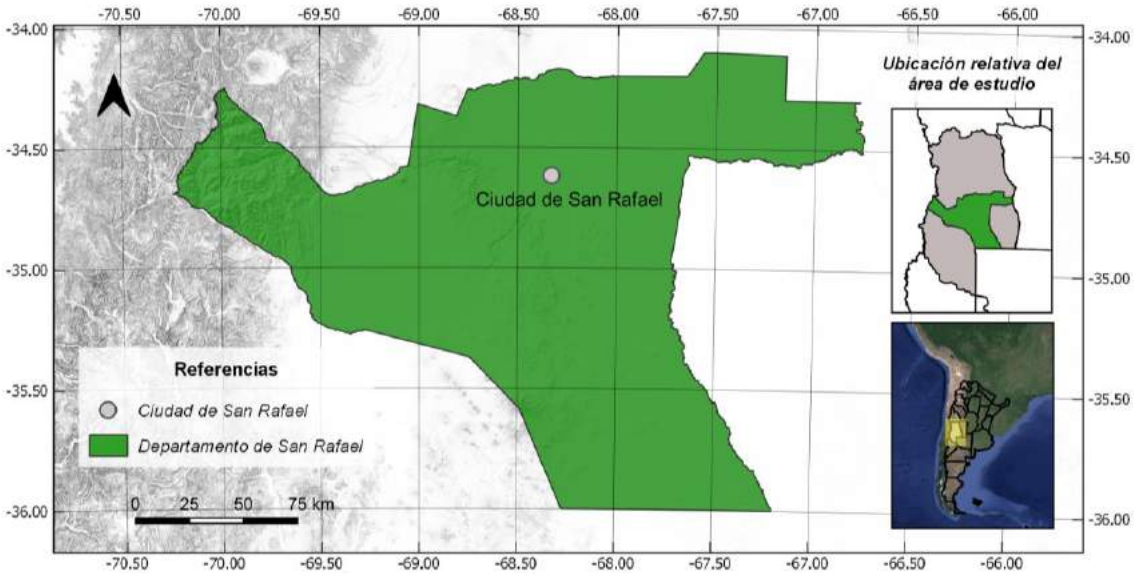


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (elaboración propia, fuentes de datos: Instituto Geográfico Nacional y Google Satellite).

Más allá de estos marcos regulatorios, el arbolado público de la provincia de Mendoza se encuentra en franco deterioro (Consejo Provincial de Defensa del Arbolado Público, 2017), situación a la que no es ajena la ciudad de San Rafael, cuya infraestructura verde urbana ha comenzado a experimentar problemas que atentan contra los servicios ambientales que presta: los árboles que han sido plantados en el pasado están desapareciendo rápidamente (cumplimiento de su ciclo biológico), otros han sido derribados por eventos climáticos extremos, a lo que se suma el crecimiento urbano que avanza sobre zonas forestadas (Rodríguez Bormioli N. et al, 2017).

Ante este escenario, surge la necesidad de monitorear de forma inteligente y sistemática el arbolado público de la zona urbana sanrafaelina, labor que ya ha sido emprendida en otras áreas del país (Benedetti G. M. et al, 2016) (Universidad Nacional de Río Cuarto, 2018) (Castelao G. F. y Fritschy B. A., 2019) (Municipalidad de Rosario, 2015), incluyendo el área metropolitana de Mendoza (Castellanos P., 2018). Esta acción es entendida como una estrategia ambiental crucial, que aportará datos sobre la cantidad de ejemplares arbóreos existentes más la consecuente información adicional sobre las especies, su estado general y la presencia de problemas fitosanitarios.

La importancia que reviste el estudio en la región ha propiciado la colaboración interinstitucional entre organismos científico-tecnológicos y organismos gubernamentales. Confluyen en esta propuesta iniciativas provenientes de: la Facultad Regional San Rafael de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRSR), la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Cuyo (FCEN-UNCuyo), la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Mendoza, la Dirección de Bosques de la provincia de Mendoza, el Museo de Historia Natural de San Rafael, la Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos de la Municipalidad de San Rafael (Dirección de Ordenamiento Territorial, Dirección de Espacios Verdes y Área Ambiental), la Secretaría de Gobierno de la Municipalidad de San Rafael (Delegación Barriales), el Consejo

Departamental de Defensa del Arbolado Público de San Rafael y representantes del Honorable Concejo Deliberante de la Municipalidad de San Rafael.
Como primera aproximación al abordaje del estudio de la infraestructura verde en la ciudad de San Rafael, se plantea como objetivo diseñar una metodología de relevamiento que permita efectuar un diagnóstico del arbolado urbano en el área de estudio mencionada.
Con la concreción del trabajo se espera establecer un punto de partida para diseñar estrategias innovadoras de conservación, mejora, planificación, gestión y control de los forestales en la ciudad de San Rafael.

DESARROLLO

Para alcanzar el objetivo propuesto, se sigue un modelo epistémico pragmático, considerando los conocimientos humanos como instrumentos de acción y buscando la validez de las hipótesis en su éxito práctico. La producción del conocimiento comienza con un problema práctico, bajo el supuesto de que el conocimiento es un producto que surge de la acción humana y conduce también a la acción humana (Hurtado de Barrera J., 2005).
El trabajo tiene un enfoque mixto (cuanti-cualitativo) y se trata de una investigación aplicada (Hernández Sampieri R. et al, 2010) con una perspectiva de abordaje macrosocial (Sautu R. et al, 2005). Dentro del ciclo holístico (Hurtado de Barrera J., 2000), la investigación presentada se encuentra en un nivel exploratorio, característico de los momentos iniciales en el conocimiento de un tema determinado (Yuni J. A. y Urbano C. A., 2014).
Para diseñar la metodología de relevamiento del arbolado urbano de la ciudad de San Rafael (objetivo del presente trabajo) se siguieron distintas etapas que cubrieron los aspectos perceptuales, aprehensivos y comprensivos.
En primera instancia, se desarrollaron reuniones del grupo de trabajo completo, que permitieron la socialización y puesta en común de los fines de cada institución, con la consecuente definición del objetivo y el alcance del estudio conjunto. Se completó la fase exploratoria y descriptiva con el análisis de información secundaria y el testimonio de referentes en la temática.
En una segunda etapa, se subdividió el grupo en equipos de trabajo específicos según los siguientes tópicos: comisión de guía de especies arbóreas, comisión de relevamiento, comisión de riego y comisión de legislación. Cada comisión avanzó en un nivel aprehensivo, construyendo criterios a partir del consenso y las visiones multi e interdisciplinarias, y validando las definiciones efectuadas a través de la comparación con antecedentes y el análisis de pruebas piloto desarrolladas en campo (ver Fig. 2).
Por último, se nuclearon las producciones de los diferentes equipos de trabajo, alcanzando como resultado de la etapa comprensiva una propuesta de metodología de relevamiento para efectuar el diagnóstico de la infraestructura verde en la ciudad de San Rafael.
Entre las herramientas empleadas para el diseño de la metodología, se destaca la utilización de un programa de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de código abierto y gratuito. Un SIG, en palabras de Moreira Muñoz A., 1996, puede ser definido como un “proceso de obtención, almacenamiento y análisis de datos que permite generar información útil para la toma de decisiones”. La principal característica de este sistema de información en particular, es que está diseñado para trabajar con datos referenciados con respecto a coordenadas espaciales o geográficas. Un conjunto de datos espaciales

asociado a una localización específica, y que sea de utilidad para la toma de decisiones, se puede denominar información geográfica (Moreira Muñoz A., 1996).



Figura 2. Fotografía tomada en prueba piloto de validación de métodos e instrumentos para el relevamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultados del proceso detallado se obtuvieron: la propuesta del sistema de relevamiento y los instrumentos para su concreción.

Sistema de Relevamiento

A continuación, se describe la metodología diseñada para llevar a cabo el relevamiento del arbolado urbano en el área de estudio.

1. **Etapa de Diseño:** engloba el desarrollo de los métodos e instrumentos necesarios para efectuar el relevamiento, entre los que se incluyen: guía de especies arbóreas, nidos y plagas; ficha de tangibles a observar; aplicación para terminales Android (teléfonos, tabletas) y método de barrido territorial.
2. **Etapa de Apropiación:** incluye la capacitación del personal afectado al relevamiento y la socialización de la actividad con la comunidad en espacios de participación ciudadana.
3. **Etapa de Ejecución:** conlleva el relevamiento y censo de especies arbóreas, esto es: la recopilación de datos de campo a partir de un sistema de barrido territorial con avance sectorizado, acotado para cada cuadrilla. Las cuadrillas estarán conformadas por un mínimo de 2 relevadores.
4. **Etapa de Análisis:** implica la interpretación y el análisis de los datos relevados, para la construcción del diagnóstico integral del arbolado urbano, a partir de un Sistema de Información Geográfica.
5. **Etapa de Sistematización:** contempla el seguimiento continuo del sistema de relevamiento y la actualización permanente de los datos, teniendo en cuenta el carácter dinámico del objeto de estudio.
6. **Etapa de Comunicación:** prevé la socialización de cartografía temática del arbolado relevado a través de un visor web, a fin de favorecer la gestión eficiente del mismo.

Todas las fases se acompañan en forma transversal con la difusión y divulgación de avances a las instituciones involucradas, colegas y comunidad en general.
El sistema diseñado es consistente con los métodos utilizados en los antecedentes ya explicitados. El alcance del mismo se circunscribe a la ciudad de San Rafael, pero con la posibilidad de ser extendido a otras áreas del departamento y replicado en otras regiones similares.

Instrumentos desarrollados

Siguiendo, se detallan los instrumentos elaborados al momento, como herramientas para la aplicación del sistema propuesto.

- **Guía de árboles urbanos de San Rafael**

Se elaboró una guía para la identificación de árboles de espacios públicos de la ciudad de San Rafael, que sirva como herramienta para el reconocimiento de ejemplares.
La metodología de trabajo utilizada para la descripción de especies se basa en la recolección de material, herborización, observaciones fenológicas, identificación por métodos clásicos de la sistemática, consultas bibliográficas y de herbarios del Museo de Historia Natural de San Rafael, descripción morfológica y registro fotográfico.
Permite identificar 50 especies de árboles introducidos que pertenecen a 20 familias botánicas. Para cada ejemplar se elaboraron fichas que contienen los datos detallados a continuación y fotografías del ejemplar completo y de la corteza, hoja, flor y fruto.

- ➢ Código
- ➢ Nombre vulgar
- ➢ Nombre científico
- ➢ Clasificación botánica
- ➢ Orden
- ➢ Familia
- ➢ Origen
- ➢ Descripción General
- ➢ Hoja
- ➢ Flor
- ➢ Fruto
- ➢ Fenología

La guía se complementará con la descripción de las plagas más habituales para estos ejemplares en la zona de estudio y con el detalle de los nidos de las aves de interés, para facilitar su reconocimiento por parte del personal de relevamiento.

- **Ficha de variables a relevar**

La ficha concentra una selección de tangibles a observar, producto del análisis y selección de variables a relevar en cada espécimen y las categorías de valor que cada una de estas puede tomar (ver Tabla 1).
Se decide discretizar la mayor parte de las variables en categorías, de modo de facilitar la carga de datos y de evitar errores o incompatibilidades que dificulten el análisis.

Ficha de variables a relevar		
N°	**Variable**	**Categorías**
1	Ubicación	variable sin categorizar (coordenadas geográficas específicas del punto relevado)
2	Especie	(listado de las 20 especies más habituales en el arbolado urbano de San Rafael, incluyendo "tocón" y "otros").
3	Altura	Menos de 5 m
		Entre 5 m y 10 m
		Más de 10 m
4	Perímetro del fuste	De 0 a 0,5 m
		De 0,5 a 1 m
		De 1 a 2 m
		De 2 a 3 m
		De 3 a 4 m
		Mayor a 4 m
5	Grado de Inclinación	Aproximadamente 90º
		Entre 90º y 45º
		Menor que 45º
6	Dirección de Inclinación	Hacia la vereda
		Hacia la calle
7	Presencia de plagas	No
		(listado de las 4 plagas más habituales en el arbolado urbano de San Rafael, incluyendo "otras").
8	Estado vegetativo del fuste	Bueno
		Regular
		Malo
9	Estado vegetativo de la copa	Bueno
		Regular
		Malo
10	Presencia de nidos	No
		(listado de los nidos más habituales en el arbolado urbano de San Rafael, incluyendo "otros").
11	Nicho	Reglamentario
		No reglamentario
		Libre
12	Acequia	Impermeabilizada
		Natural
13	Riego	Con flujo
		Sin flujo
14	Implantación	Correcta
		Incorrecta
15	Raíces	Expuestas
		No expuestas

Tabla 1. Variables a relevar en cada ejemplar arbóreo y categorías de valor.

- **Aplicación ODK Collect**

Como herramienta digital para registrar las observaciones, en el marco del relevamiento de arbolado público, se decidió diseñar una aplicación ODK Collect. ODK Collect es una aplicación de código abierto, desarrollada por el Departamento de Ciencias e Ingeniería Informática de la Universidad de Washington con el fin de poder capturar diferentes tipos de datos en terminales (tabletas o teléfonos inteligentes) con sistema operativo Android (Universidad de Washington, 2020). El único requisito que la aplicación solicita es el registro con un usuario de Google y la misma puede ser descargada fácilmente desde Google Play (Play Store). La aplicación ODK Collect es de sencilla utilización y no requiere mayores conocimientos por parte de los usuarios. La diversidad de datos que utiliza la aplicación es amplia: permite el ingreso de datos de texto, numéricos, ubicación GPS, imágenes y audio, entre otros. También posibilita la creación de campos de selección única o múltiple, tras un listado predefinido.

Para su diseño se utilizaron las variables y campos consignados en la ficha de tangibles. Adicionalmente a estas variables preestablecidas (detalladas en la tabla 1), la aplicación solicita al relevador el registro de los siguientes datos: identificación del relevador, identificación del ejemplar relevado, fotografía del individuo y observaciones generales (opcional). A su vez, la ubicación del espécimen (coordenadas geográficas y altitud) se autocompleta a partir de la vinculación entre la aplicación y *Google Satellite*. El diseño del formulario de carga final fue desarrollado desde un ordenador con especificaciones técnicas previamente resueltas. La transferencia de los datos obtenidos mediante la aplicación se exporta en formatos CSV y KML, permitiendo la visualización de resultados a través de hojas de cálculo y SIG (ver Fig. 3).

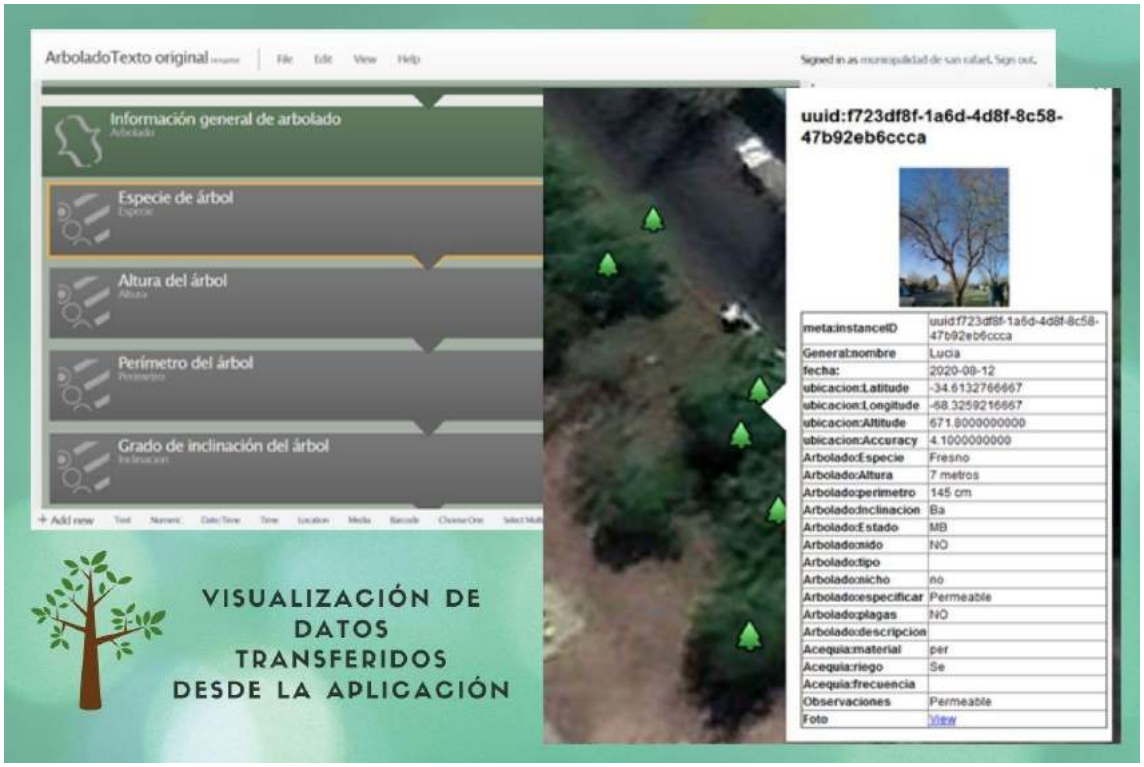


Figura 3. Visualización en SIG de datos relevados a partir de la aplicación.

CONCLUSIONES

A partir del proceso enunciado, con base en la colaboración interinstitucional y en la participación multidisciplinaria, se logró el diseño de una metodología para efectuar el relevamiento de la infraestructura verde urbana de la ciudad de San Rafael.

La aplicación de la metodología, combinada con el uso de los instrumentos desarrollados, permitirá la construcción de una herramienta de diagnóstico en tiempo real, sistematizada y fácilmente actualizable, que sirva como insumo para la toma de decisiones.

El SIG que se propone permitirá el abordaje de estudios espaciales complejos en distintas escalas temporales, con gran potencial para la gestión futura del arbolado urbano, la concreción de diagnósticos evolutivos, el análisis de riesgos y la identificación de fortalezas y debilidades del sistema.

Como finalidad del trabajo, se espera concretar un aporte valioso para la planificación ambiental, considerándose a la infraestructura verde urbana como un aspecto relevante del desarrollo territorial, con influencia en la sustentabilidad de la ciudad.

REFERENCIAS

Ajuntament de Barcelona. *El Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020*. Recuperado de https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana (2014).

Benedetti, G. M., Duval, V. S. y Campo, A. M. Propuesta para el estudio del arbolado urbano. Caso de estudio; Pigüé, provincia de Buenos Aires. *Revista Proyección* 10, 244–258 (2016).

Castelao, C. F. y Fritschy, B. A. Diagnóstico del arbolado urbano de alineación en vecinales La Esmeralda y Guadalupe Este, Ciudad de Santa Fe, Argentina. *Contribuciones Científicas GAEA* 31, 99–118 (2019).

Castellanos, P. *Sistema integrado de información y gestión para la refuncionalización y recuperación del arbolado urbano en el área Metropolitana de Mendoza*, Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Mendoza, 2018.

Consejo Provincial de Defensa del Arbolado Público. *Informe del Consejo Provincial de Defensa del Arbolado Público para la Legislatura de Mendoza*, 2017.

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. *Plan Urbano Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires*. Recuperado de https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes (2002).

Honorable Concejo Deliberante de San Rafael. *Ordenanza Municipal N° 9.814*. Recuperado de http://181.209.105.86:8080/invitadoDigesto/Queries/Documents (2010).

Honorable Concejo Deliberante de San Rafael. *Ordenanza Municipal N° 9.815*. Recuperado de http://181.209.105.86:8080/invitadoDigesto/Queries/Documents (2010).

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio M. P. *Metodología de la Investigación*, McGraw Hill, Ciudad de México, 2010.

Hurtado de Barrera, J. *Cómo formular objetivos de investigación*, Fundación Sypal, Caracas, 2005.

Hurtado de Barrera, J. *Metodología de la Investigación Holística*, Fundación Sypal, Caracas, 2000.

Legislatura de Mendoza. *Ley Provincial N° 7.874.* Recuperado de https://www.legislaturamendoza.gov.ar/consulta-de-leyes-provinciales (2008).

Martinez, C. F. Gestión y monitoreo del bosque urbano en ciudades de zonas áridas. Caso de Mendoza - Argentina. *2º Foro Latinoamericano y del Caribe sobre Bosques Urbanos, Silvicultura Urbana, arboricultura y áreas verdes*, FAO (2019).

Martinez, C. F., Cantón, M. A. y Roig Juñent, F. A. Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas. *Interciencia* 39(12), 890–897 (2014).

Moreira Muñoz, A. Los Sistemas de Información Geográfica y sus aplicaciones en la conservación de la diversidad biológica. *Ciencia y Ambiente* 12 (2), 80–86 (1996).

Moreno, O. I., Lillo, C. y Gárate, V. La infraestructura verde como espacio de integración. *XI Simposio de la Asociación Internacional de Planificación Urbana y Ambiente (UPE 11)* 1, 148–156. ISBN: 978-950-34-1133-9 (2014).

Municipalidad de Posadas. *Plan Urbano Ambiental Posadas*. Recuperado de https://posadas.gov.ar/planurbano/plan-urbano-ambiental-posadas (2012).

Municipalidad de Rosario. *Censo de arbolado de alineación de la ciudad de Rosario 2015*. Recuperado de https://www.rosario.gob.ar/web/sites/default/files/censo_arbolado_final (2015).

Quiroz Benítez, D. E. *Implementación de infraestructura verde como estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático*, SEDATU, Ciudad de México, 2018.

Rodríguez Bormioli, N., Di Franco, L., Cucciufo. E. y Craig. E. Generación de cartografía temática del arbolado urbano mediante el uso de SIG. *Cardinalis* 3(5), 117–142 (2017).

Sautu, R., Boniolo, P., Dalle, P. y Elbert, R. *Manual de metodología*, CLACSO, Buenos Aires, 2005.

Unión Europea. *Construir una infraestructura verde para Europa*. ISBN: 978-92-79-39996-1. DOI: 10.2779/2738 (2014).

Universidad de Washington. *ODK Documentation*. Recuperado de https://docs.getodk.org/collect-intro/ (2020).

Universidad Nacional de Río Cuarto. *Relevamiento del arbolado urbano en la ciudad de Río Cuarto*. Recuperado de http://www.ayv.unrc.edu.ar/index.php/es/noticias-novedades (2018).

Vargas, M. A. y Balmaceda N. Forestación urbana mediante compensación ambiental. *Revista del Centro de Políticas Públicas de la Universidad Católica de Chile* 3 (43), 1–12 (2011).

Vásquez, E. A. Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades. *Revista de Geografía Norte Grande* 63, 63–86 (2016).

Yuni, J. A. y Urbano, C. A. *Técnicas para Investigar. Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación*, Editorial Brujas, Córdoba, 2006.

EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO DIAMANTE (MENDOZA, ARGENTINA)

Biondi M.L., Genovese F.V., Biondi R.A., Castro C.A., Pallares Lopez V. y Galat M.A.

Grupo de Estudios sobre Desarrollo Territorial, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

e-mail: lbiondi@frsr.utn.edu.ar

RESUMEN

La demanda hídrica de una cuenca es, en esencia, el consumo de agua dentro de la misma, y está compuesta por el consumo endosomático y consumo exosomático. El primero hace referencia a la cantidad de agua necesaria para las funciones vitales de la biota; el segundo corresponde a los usos del agua prescindibles desde el punto de vista biológico, relacionados con factores culturales, económicos y sociales. Conocer la evolución de la demanda hídrica en una región permite su contraste con la oferta de agua futura posible, herramienta clave para la planificación y gestión integral del recurso hídrico, con vital importancia en zonas áridas. En la provincia de Mendoza (Argentina), la escasez de agua propia de la región se suma a los escenarios de insuficiencia hídrica creciente que plantea el cambio climático, siendo la cuenca del Río Diamante una de las áreas más afectadas dentro del territorio. Los antecedentes disponibles permiten conocer las características de la oferta de agua futura en la zona de estudio. Como complemento, esta investigación se propone aportar a la previsión prospectiva de la demanda hídrica de la cuenca del Río Diamante para el año 2050, considerando variables ambientales, socioeconómicas, culturales y de gobernanza. La metodología aplicada se subdividió en dos etapas: en la fase pre-prospectiva se construyó un diagnóstico utilizando herramientas como el Método de Análisis Estructural de Variables y la Matriz de Estrategias e Identidades; en la fase prospectiva se elaboraron las hipótesis de evolución de la demanda hídrica de la cuenca, a partir de la aplicación del Método Delphi para consultas a expertos. Los primeros resultados del trabajo permiten conocer los posibles escenarios prospectivos de demanda hídrica en la cuenca del Río Diamante con mayor nivel de profundidad e integración, a partir de un enfoque holístico de su evolución en los próximos 30 años.

Palabras Clave: Demanda hídrica, Prospectiva, Evolución, Zonas áridas, Cambio climático.

INTRODUCCIÓN

Se define a la demanda hídrica como la cantidad de agua necesaria para satisfacer a los usuarios a del recurso en un lugar y en un período de tiempo determinado, asociada a los usos específicos y a un precio dado (World Meteorological Organization, 2012).

El consumo de agua dentro de una cuenca determinada se compone de la fracción endosomática y la exosomática. El consumo endosomático hace referencia a la cantidad de agua necesaria para las funciones vitales de la biota; el consumo exosomático corresponde a los usos del agua prescindibles desde el punto de vista biológico, relacionados con factores culturales, económicos y sociales (Departamento General de Irrigación, 2016). El consumo de agua endosomático aumenta de forma proporcional al

crecimiento demográfico, mientras que el consumo exosomático varía en función del cambio de hábitos sociales.

La demanda hídrica comprende el consumo efectivo de agua para uso doméstico, público y en cadenas productivas (sector primario, secundario y terciario), incluyendo también el agua extraída no consumida, relacionada con las pérdidas y eficiencias. A su vez, se contempla en su concepción el caudal ambiental, entendido como el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

El uso del agua ha aumentado un 1 % anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por una combinación de aumento de la población, desarrollo socioeconómico y cambio en los modelos de consumo. Se espera que esta demanda mundial siga aumentando a un ritmo parecido hasta 2050, lo que representa un incremento del 20 % al 30 % por encima del nivel actual de uso del agua. En la actualidad, aproximadamente 4.000 millones de personas en el mundo padecen la escasez de agua, cuyos niveles seguirán aumentando a medida que crezca la demanda de agua y se intensifiquen los efectos del cambio climático (UNESCO, 2019).

En Argentina, los oasis productivos del centro-oeste se presentan como regiones muy vulnerables a los cambios de temperatura y precipitación, donde la aridez del territorio exige la planificación y optimización del uso del agua (Balairón Pérez L., 2002). Vastos antecedentes aportan conocimientos acerca de la evolución de la disponibilidad hídrica en Los Andes Centrales frente a la variabilidad climática, en los que se sostienen aspectos como: la variabilidad de las nevadas en el tiempo es muy alta, pero su tendencia es a disminuir; los glaciares de la región muestran una retracción generalizada; el aumento de la temperatura está alterando el hidrograma de los ríos; los escenarios climáticos futuros muestran cambios importantes en la precipitación y la temperatura; las cuencas más afectadas serán las ubicadas al sur de la región: Río Diamante y Río Atuel (Rivera J. et al, 2017), (Villalba R. et al, 2016), (Araneo D. y Villalba R., 2015), (Bonisegna J. y Villalba R., 2006).

Desde una mirada integral es necesario no solo conocer la oferta actual o futura de agua bajo la forma de caudales, sino también la demanda actual y fundamentalmente futura del recurso. Esto se explica en que una leve disminución en el escurrimiento puede ser un agravante frente a un aumento repentino de la demanda, proceso característico en la actualidad debido a la globalización económica y al posicionamiento de determinados territorios para la producción (Salomón M. A. et al, 2017). Prever la evolución de la demanda hídrica en una región permite su contraste con la oferta de agua futura posible (balance hídrico prospectivo), herramienta clave para la planificación y gestión integral del recurso hídrico, con vital importancia en zonas áridas.

La provincia de Mendoza pertenece una zona clasificada como árida y semiárida, con un significativo déficit hídrico. El aprovechamiento de las aguas de sus ríos es lo que permite el establecimiento de ciudades y zonas agrícolas. El desarrollo socioeconómico de la región depende principalmente de la producción agropecuaria, siendo la disponibilidad de riego artificial lo que ha posibilitado la creación de los oasis. En su extensión territorial, todos los ecosistemas están afectados por procesos de desertificación con tendencia creciente (Abraham E. M. y Salomón M. A., 2011).

La zona de influencia del Río Diamante abarca una amplia superficie de la provincia de Mendoza (ver Fig. 1). El río nace en la laguna homónima que está ubicada en la cordillera

de Los Andes y luego escurre hacia el este, desembocando en el Río Desaguadero. La cuenca respectiva tiene una superficie aproximada de 11.000 km^2 y comprende parte del territorio de tres departamentos: San Carlos, San Rafael y General Alvear (Salomón M. A. et al, 2017).

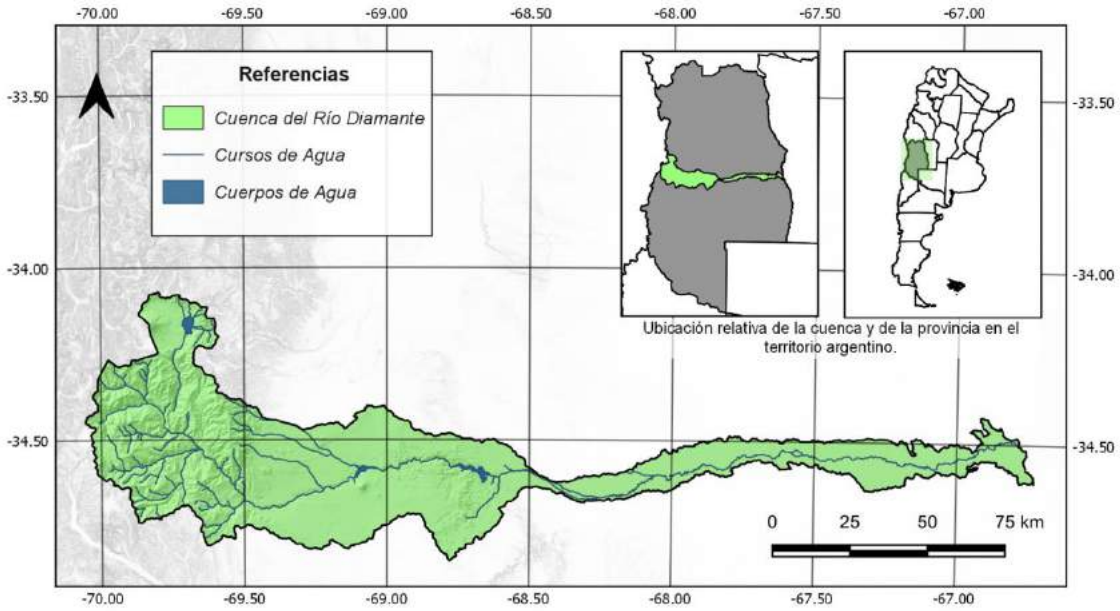


Figura 1: Mapa de ubicación de la cuenca del Río Diamante. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional (2020).

El Río Diamante abastece principalmente al departamento de San Rafael, dotando a 162.000 habitantes, lo que representa más del 89 % de la población del departamento (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2011). La oferta hídrica superficial media del Río Diamante es de 1151 hm^3 (Salomón M. A. et al, 2017). Su régimen es nivo-glacial y por ello está estrechamente relacionado con los glaciares ubicados en la cordillera de Los Andes.

Los antecedentes disponibles vinculados a los recursos hídricos en la región permiten conocer las características de la oferta esperada en el área de estudio, según distintos escenarios asociados al cambio climático global. Sin embargo, para poder hacer un balance hídrico prospectivo y gestionar el recurso de forma eficiente, es necesario también conocer la posible demanda hídrica futura.

Con este marco, el presente trabajo se propone ampliar el conocimiento respecto a los escenarios de demanda hídrica en un horizonte de 30 años, teniendo en cuenta variables ambientales, socioeconómicas, culturales y de gobernanza, como: el clima, el uso del suelo, el ordenamiento territorial y la matriz productiva de la región. De esta manera se espera generar un enfoque holístico, que permita conocer los posibles escenarios prospectivos con mayor nivel de profundidad e integración, aportando una visión innovadora sobre la demanda hídrica en la cuenca del Río Diamante para el año 2050.

MÉTODOLOGÍA

El objetivo general de la investigación que se expone es predecir la evolución de la demanda hídrica en la cuenca del Río Diamante, en un horizonte temporal de 30 años. Para ello, resulta necesario: identificar y analizar las variables socioeconómicas y

ambientales más influyentes en el cambio de la demanda hídrica de la zona; definir en forma cuali-cuantitativa los usos del agua futuribles en la cuenca hidrográfica; explicar los posibles escenarios futuros del recurso hídrico en la cuenca estudiada; y prever estrategias de gestión hídrica y de planeamiento territorial que permitan alcanzar escenarios deseados.

Para alcanzar los logros explicitados se plantea un proceso metodológico de enfoque cuantitativo (Hernández Sampieri R. et al, 2010) con un nivel comprensivo dentro de la espiral holística investigativa (Hurtado de Barrera J., 2000). Como hipótesis principal a validar, se considera que la demanda hídrica de la cuenca del Río Diamante en el año 2050 experimentará un aumento respecto a la situación actual, como consecuencia de procesos globales y regionales (cambio climático, aumento en la demanda de alimentos y energía, mayor demanda de productos industriales y minerales).

La complejidad particular que presenta el estudio de la demanda hídrica es que depende de factores ambientales, económicos, sociales, políticos y culturales. Algunas variables, como las climáticas y demográficas, pueden analizarse a partir de modelos matemáticos. En cambio, para evaluar la evolución de variables de consumo vinculadas a aspectos socioeconómicos, se decide emplear métodos propios de la prospectiva.

La prospectiva es una disciplina científica que aborda el estudio de la evolución de los sistemas complejos de la realidad social, es decir, conjuntos heterogéneos integrados por un gran número de componentes en transformación, abiertos al contexto, con propiedades sistémicas emergentes independientes de las propiedades particulares de sus componentes (Godet M., 2007). Su objetivo es la previsión de futuros posibles, a partir de la articulación dinámica de interacciones entre pasado, presente y futuro.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se sigue un proceso metodológico que se subdivide en tres fases (ver Fig. 2):



Figura 2: Descripción de fases metodológicas propuestas para alcanzar el objetivo.

La metodología desarrollada se apoya en antecedentes regionales, nacionales e internacionales (Vitale, 2016), (Puebla, 2014), (Instituto Nacional del Agua, 2010), (Vásquez J. M. y Ortegón E., 2006), (Van Der H. y Kroll A. M., 2014). La descripción detallada de los métodos de prospectiva *Matriz de Estrategias e Identidades*, *Análisis Estructural de Variables*, *Método Delphi*, *Talleres de Prospectiva* y *Construcción de Escenarios*, puede encontrarse en la bibliografía de referencia (Beinstein J., 2016), (García Valdez M. y Suárez Marín, M., 2013).

Para la elaboración del diagnóstico de la situación actual de los recursos hídricos en el área de estudio se analizó información secundaria de diversas fuentes referida a la disponibilidad hídrica, la demanda hídrica, los usos de agua en la cuenca, las eficiencias del sistema hídrico, la infraestructura de aprovechamiento y la legislación vigente.

Para la construcción de la Matriz de Estrategias e Identidades se complementaron los datos disponibles con el conocimiento propio del grupo de trabajo y con entrevistas a referentes de las principales instituciones involucradas.

La identificación de las variables significativas en la evolución de la demanda hídrica de la cuenca se realizó a partir del estudio del marco conceptual. Luego, con el método de Análisis Estructural, se calcularon la motricidad y dependencia de cada una de estas (Beinstein J., 2016).

Para el desarrollo del Método Delphi de consultas a expertos se elaboró un cuestionario que combina ciertas características de una escala de opinión, compuesto principalmente por preguntas cerradas, categóricas, de tipo opción múltiple; se incluyen también escalas de ordenación y escalas valorativas sumativas (Murillo Torrecilla J., 2013). En general, las variables evaluadas tienen un nivel de medición nominal (Hernández Sampieri R. et al, 2010). El cuestionario es autoadministrado, es decir que se proporciona directamente a los participantes, quienes lo contestan, sin intermediarios. Por las características propias del Método Delphi, la muestra es no probabilística (dirigida), ya que la elección de los expertos a consultar se hace en función de la experiencia y el conocimiento de la persona en el tema. El tamaño de la muestra utilizada es de 30 individuos.

El análisis cuantitativo de los datos obtenidos se realizó principalmente a partir de la distribución de frecuencias de las categorías de cada variable, datos que servirán como insumo para la construcción de supuestos e hipótesis sobre los futuros posibles de la demanda hídrica en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultados del proceso metodológico descripto, se expone una síntesis de los productos obtenidos en cada fase.

Fase pre-prospectiva (diagnóstico, análisis de involucrados, variables críticas)

- La demanda hídrica anual en la cuenca del Río Diamante ronda en la actualidad los 780 hm^3.
- El derrame anual del Río Diamante durante el año hidrológico 2019-2020 fue de 415 hm^3 y el pronóstico para la temporada 2020-2021 es de 660 hm^3.
- El organismo con mayor incidencia y capacidad de acción frente a la evolución de la demanda hídrica de la cuenca de estudio es el Departamento General de Irrigación.
- Los usuarios agrícolas del recurso hídrico son el grupo más decisivo respecto a la demanda hídrica de la cuenca, ya que en la actualidad concentran el 96 % del consumo de agua del Río Diamante.

- Las variables con mayor motricidad directa sobre la demanda hídrica son la temperatura ambiente y las características de los suelos agroproductivos.
- La variable de menor dependencia y con mayor impacto sobre la demanda hídrica de la cuenca es la eficiencia del sistema de riego.

Fase prospectiva (hipótesis sobre futuros posibles)

- En la opinión de los expertos consultados, los fenómenos globales que tendrán mayor impacto en la evolución de la demanda hídrica de la cuenca del Río Diamante son el incremento en la demanda de alimentos y el cambio climático.
- El uso consuntivo de agua de la cuenca que posiblemente experimentará mayores modificaciones respecto a la actualidad será el uso ganadero.
- La demanda hídrica de uso industrial puede cambiar sustancialmente si se modifica la legislación respecto a la actividad minera y petrolífera.
- Las medidas de gestión más relevantes para la mejora de la cobertura de la demanda en la cuenca serán la inversión en medidas no estructurales y en obras de ingeniería.

A partir de la finalización de la aplicación del Método Delphi, que todavía se encuentra en proceso, se tendrá un análisis cuantitativo porcentual de los distintos aspectos consultados. Como acción futura, resta la concreción de los tallares de prospectiva. Con esto, se ajustarán las distintas hipótesis de evolución de demanda hídrica en la cuenca y se construirán los escenarios futuros posibles.

Como producto final de la investigación, resultado de la fase de pos-prospectiva, se espera elaborar documento de planificación con estrategias y recomendaciones para alcanzar escenarios futuros deseados, y ser transferido a los organismos tomadores de decisiones en la temática dentro de la cuenca del Río Diamante.

CONCLUSIONES

Los primeros resultados del trabajo permiten formular hipótesis prospectivas de demanda hídrica en la cuenca del Río Diamante con mayor nivel de profundidad e integración de lo conocido hasta el momento, a partir de un enfoque holístico de su evolución al 2050.
Según lo analizado hasta el momento, los cambios esperados reflejan un aumento del consumo de agua en la cuenca respecto a la situación actual. Esto, sumado a la disminución de la oferta hídrica que se sostiene en el tiempo, generará un balance negativo con la consecuente insatisfacción de la demanda y posibles inconvenientes en el sistema de aprovechamiento del Río Diamante.

REFERENCIAS

Abraham E. M. y Salomón M. A. Capítulo: Experiencias en el combate de la desertificación en Mendoza-Argentina (183–206). *Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro,* Instituto Nacional do Semiárido, Ministerio de Ciencia, Tecnología de Brasil y Embrapa Semiárido, Campiña Grande, 2011.

Araneo, D. y Villalba, R. Variability in the annual cycle of the Río Atuel streamflows and its relationship with tropospheric circulation. *Int. J. Climatology* 35, 2948–2967 (2015).

Balairón Pérez, L. *Gestión de recursos hídricos.* Edicions UPC, Barcelona, 2002.

Beinstein, J. *Manual de prospectiva: guía para el diseño e implementación de estudios prospectivos,* Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, Buenos Aires, 2016.

Bonisegna, J. y Villalba, R. *Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, Buenos Aires, 2006.

Departamento General de Irrigación. *Aquabook*. Recuperado de: http://aquabook.agua.gob.ar/ (2016).

García Valdez M. y Suárez Marín, M. El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. *Revista Cubana de Salud Pública* 39(2), 253–267 (2013).

Godet, M. *Manual de prospectiva estratégica*, Dunod, París, 2007.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio M. P. *Metodología de la Investigación*, McGraw Hill, Ciudad de México, 2010.

Hurtado de Barrera, J. *Metodología de la Investigación Holística*, Fundación Sypal, Caracas, 2000.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Sistema de información del recurso hídrico - demanda*. Recuperado de: http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/homeSIRH/HOME/demanda-n3.html (2014).

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*. INDEC, Buenos Aires, 2011.

Instituto Nacional del Agua. *Prospectiva hídrica*, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Buenos Aires, 2010.

Murillo Torrecilla, F. J. *Cuestionarios y escalas de actitudes*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2013.

Puebla, P. *La prospectiva como herramienta de gestión. Su aplicación en el sector hídrico*, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 2014.

Rivera, J., Peñalba, O., Villalba, R. y Araneo, D. Spatio-Temporal Patterns of the 2010–2015 Extreme Hydrological Drought across the Central Andes. *Water* 9, 652–670 (2017).

Salomón, M. A., Pina, J. A., Biondi, R. A., Liseno, F., González, M. R., Lorenzo, F., Atencio, A., y Gomensoro, F. *Balance Hídrico Río Diamante*. Departamento General de Irrigación, Mendoza, 2017.

Van Der H. y Kroll A. M. *Experiencia mundial en estudios a largo plazo sobre el agua*, IPTSECS, Bruselas, 2004.

Vásquez J. M. y Ortegón E. *Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América Latina y el Caribe*, CEPAL, Santiago de Chile, 2006.

Villalba, R., Bonisegna, J., Mariokas, M. H., Cara, L., Salomón, M. A. y Possoli, J. Cambio climático y recursos hídricos: el caso de las tierras secas del oeste argentino. *Ciencia Hoy* 25(149), 49–55 (2016).

Vitale, J. *Guía de prospectiva para el ordenamiento territorial rural de la Argentina a nivel municipal*, INTA, Buenos Aires, 2016.

World Meteorological Organization. *International glossary of hydrology*, ISBN 978-92-63-03385-8, UNESCO, Ginebra, 2012.

UNESCO. *Informe Mundial de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*, ISBN 978-92-3-300108-4, ONU, París, 2019.

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ACUÍFEROS CON APOYO DE ISÓTOPOS ESTABLES (^{18}O y ^{2}H) EN ALEJANDRO ROCA. CÓRDOBA. ARGENTINA.

Blarasin M.[a], Cabrera A.[a], Matteoda E.[a], Becher Quinodoz F.[b], Eric C. [a], Lutri V. [ab], Felizzia J.[a], Giacobone D.[b] y Giuliano Albo J.[a]

[a]*Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Rio Cuarto, ARGENTINA*
[b] *Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas y Técnica, CONICET, ARGENTINA*

e-mail: mblarasin@unrc.edu.ar

RESUMEN

Numerosas ciudades se abastecen exclusivamente de agua subterránea, por lo que su estudio y monitoreo es esencial. El objetivo de este trabajo es mostrar las características hidrogeológicas de la localidad de Alejandro Roca (Córdoba) y sector rural circundante, sumando a los métodos tradicionales hidrogeológicos el apoyo de técnicas isotópicas. Se observó que el acuífero libre, formado por sedimentos eólicos y fluviales finos, tiene escasas aptitudes de uso humano por el alto valor de sales, arsénico, flúor y nitratos (éstos últimos derivados de contaminación), lo que llevó gradualmente al uso de aguas subterráneas más profundas alojadas en capas acuíferas confinadas. Éstas mostraron salinidad y valores de arsénico y flúor más bajos, ya que los sedimentos que las constituyen, genéticamente vinculados a paleocauces del río Cuarto, están integrados por minerales más inertes (abundancia de cuarzo) disminuyendo así los procesos de meteorización que liberan elementos y compuestos químicos al agua. Desde el punto de vista isotópico se encontró que los valores de ^{18}O y ^{2}H del acuífero libre y las capas acuíferas confinadas resultaron similares a precipitaciones y entre sí, indicando su vínculo hidráulico. Sin embargo, al Este de la localidad algunas perforaciones profundas captan de capas confinadas con agua isotópicamente más empobrecida que el acuífero libre, probablemente de edad pleistocena, pero más saladas. El innovador muestreo de agua de canillas ("tap water"), resultó útil para evaluar las mezclas de agua de las perforaciones que las suministran, lo que aporta a interpretaciones hidrogeológicas y de abastecimiento generales. Sin embargo, para evaluar aspectos específicos a diferentes profundidades es necesario muestrear directamente cada fuente de abastecimiento. El modelo hidrogeológico conceptual definido permitió aconsejar una nueva perforación profunda al Oeste de la localidad para interceptar agua dulce apta para suplementar la actual batería de suministro.

Palabras Clave: agua subterránea- agua de canillas- mezclas-suministro urbano

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea, la más abundante en estado líquido en ambientes continentales, es un agente geológico de vital importancia ya que sostiene ecosistemas (lagos, humedales, etc.) en numerosas regiones y participa de múltiples procesos geológicos (Gleeson et al., 2016) Además abastece variadas actividades (consumo humano, riego, industria, etc.), aspecto destacable también en Argentina y específicamente en la provincia de Córdoba, donde se usa para emprendimientos socio-productivos diversos (Blarasin et al., 2014). Si bien en Córdoba hay agua subterránea en abundante cantidad y calidad, con los mejores acuíferos principalmente vinculados a áreas periserranas o abanicos aluviales, aparecen numerosos problemas de abastecimiento, dependiendo fundamentalmente de las condiciones geológicas del lugar (Blarasin et al., 2014, Becher Quinodoz et al.,

2015). La localidad de Alejandro Roca (Córdoba), de 5.300 habitantes se abastece para las actividades urbanas y periurbanas de agua subterránea procedente del acuífero libre y, para distribución de agua corriente, de capas acuíferas más profundas, las que poseen diverso grado de confinamiento.

Dado que la zona tiene una conformación litológica que controla la composición química del agua, aparecen en ella elementos químicos disueltos nocivos para la salud (Blarasin et al., 2001). La Cooperativa de Agua del lugar, concesionario de la explotación y distribución de agua, hace muchos años que solicita asesoramiento a la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) para mejorar el servicio, razón por la cual se han realizado diversos estudios hidrogeológicos para monitoreo del recurso y ubicación de futuras captaciones. En el último año, a través del convenio firmado entre la Cooperativa de Agua y el Municipio de la localidad con la Facultad de Cs. Exactas Fco. y Naturales (UNRC) de la que depende el Dpto. de Geología, se llevaron a cabo estudios con técnicas isotópicas para mejorar el modelo de funcionamiento hidrogeológico. En este marco el objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos de las características hidrogeológicas del área de la localidad de Alejandro Roca y sector rural circundante, sumando a los métodos tradicionales técnicas isotópicas complementadas con modelación numérica geoquímica preliminar.

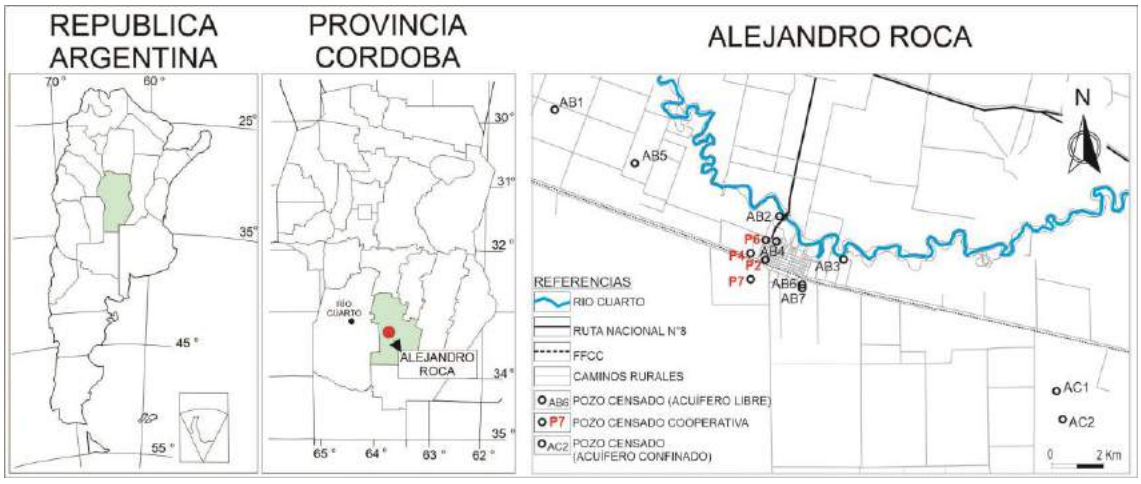


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio y sitios censados.

MÉTODOS

Se efectuó la recopilación de trabajos geológicos e hidrogeológicos generales del Sur de Córdoba (Blarasin et al., 2014 y Maldonado, 2014), y los datos de un trabajo hidrogeológico previo de más detalle (escala 1:50.000) realizado en la zona para la propia Cooperativa de Alejandro Roca (Blarasin et al., 2001). Las tareas de campo se concentraron en la localidad de Alejandro Roca, aunque en esta oportunidad se realizó un relevamiento de perforaciones más alejadas, aguas arriba y aguas abajo de la localidad, cuya localización se observa en los mapas respectivos. Los nuevos datos regionales disponibles permitieron verificar los cambios de calidad de agua a diversas profundidades en las diferentes capas acuíferas, dado que las perforaciones censadas eran de diferente profundidad y diseño. Además de aquellas disponibles en el estudio previo de la localidad (Blarasin et al., 2001), para este estudio se censaron otras 9 perforaciones existentes sumándose nuevamente las de la Cooperativa de la localidad responsable del suministro de agua. El organismo posee una batería de perforaciones (P_2, P_4, P_6 y P_7) ubicadas en inmediaciones del área urbana que conducen el agua a un tanque de acumulación y distribución. Al momento del muestreo las perforaciones P_4,

P_6 y P_7, estaban en funcionamiento llenando el tanque donde se produce la mezcla de las mismas (MIX). Desde el tanque de distribución (ubicado al lado de P2) el agua es dirigida mediante red a los diferentes domicilios donde es utilizada por los ciudadanos para diversos usos. Se contó además con información de perfiles litológicos de perforaciones profundas cedidas por AGD (Aceitera Gral. Deheza en Alejandro Roca) y estancias locales. El análisis isotópico se realizó en muestras de agua extraídas de canillas ("tap water", Fig. 2) de 15 casas de la localidad y en muestras de perforaciones seleccionadas, especialmente las de la cooperativa. para realizar las correspondientes interpretaciones.

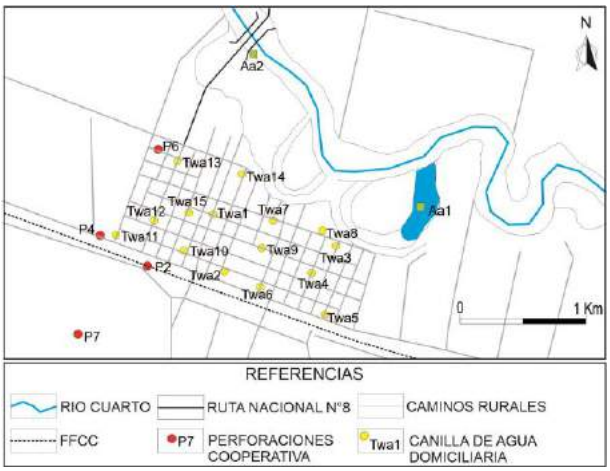


Figura 2 Mapa de ubicación de las perforaciones de la cooperativa y muestreo de agua domiciliaria (Tw)

Las perforaciones que captan del acuífero libre censadas para el estudio son en general más someras y tienen profundidades de 20 a 60 m. Por su parte, las profundidades de las perforaciones que captan de capas acuíferas con algún grado de confinamiento, a mayor profundidad, son variadas pero superan los 100 m. En el caso especifico de las perforaciones de la Cooperativa de Agua de la localidad, las perforaciones tienen las siguientes profundidades: P_2 (143 m), P_4 (130 m), P_6 (198 m) y P_7 (225 m). La profundidad del nivel freático o piezométrico se midió con sonda piezométrica con señal sonora. Para evaluar aspectos hidráulicos del acuífero, se contó con ensayos hidráulicos realizados en la región del Sur de Córdoba en este tipo de sedimentos (Blarasin et al., 2014, Maldonado, 2014). Se determinaron in situ parámetros de calidad como pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica (CE), parámetro que permite definir Sales Disueltas Totales). Las muestras acondicionadas para cada análisis, fueron enviadas a los diferentes laboratorios. Los análisis físico-químicos del agua se llevaron a cabo en el Lab. de Geoquímica del Dpto. de Geología determinándose componentes mayoritarios (CO_3H^-, $CO_3^=$, $SO_4^=$, Cl^-, Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+ y K^+), componentes minoritarios de interés en la zona (F^-, As, NO_3^-) y determinaciones complementarias de dureza, alcalinidad y pH. Se usaron métodos de fotometría de llama, espectrofotometría UV, electrodos Orion de ion selectivo y titulaciones volumétricas convencionales según Standard Methods (APHA, 2005). Los análisis de isótopos estables ^2H y ^{18}O de la molécula de agua fueron realizados en el laboratorio del Centro de Geología de Costas de la Universidad Nacional de Mar del Plata mediante espectroscopía LASER (Los Gatos Research, Inc.), donde se realiza control cruzado de las mediciones con el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). Los resultados se expresan como desviaciones isotópicas (δ), en ‰ de acuerdo a la ecuación $\delta = 1000\ (Rs - Rp) / Rp$ siendo R la razón isotópica ($^2H/^1H$, $^{18}O^{16}O$) de la referencia internacional (Rp) y de las muestras de aguas (Rs). La referencia usada es el Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). La incertidumbre para $\delta^{18}O$ es ± 0,15 ‰ y para δ^2H es ± 1,0 ‰. Los resultados isotópicos de los diferentes sistemas hidrológicos se volcaron en el diagrama isotópico en relación a la recta meteórica más completa de la región que es la de la ciudad de Rio Cuarto (Cabrera et al., 2019). En la tabla 1 se muestra un resumen de los resultados de los análisis físico-químicos e isotópicos. Las muestras fueron clasificadas geoquímicamente en función de los iones dominantes (Custodio, 1993), elaborándose

mapas de distribución areal de CE e hidroquímicos de interés (diagramas de Stiff). Para validar el modelo de mezcla en tanque del agua de distribución de la cooperativa se aplicó la técnica modelación numérica geoquímica a través del programa computacional PHREEQC 2.17 (Parkhurst y Apello, 2013). En la modelación se consideraron como variables químicas (constraints) a los iones mayoritarios HCO_3^-, SO_4^{-2}, Cl^-, Na^+, K^+, Ca^{+2} y Mg^{+2}, y resultados isotópicos ($\delta^{18}O$; δ^2H). Las fases contempladas son aquellas con las que tuvo contacto el agua (sulfato atmosférico, calcita, fases de intercambio (CaX, NaX, KX, MgX) y CO_2 (g) disuelto en el agua).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CLIMA, GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

En el marco de la distribución de precipitaciones medias en la provincia de Córdoba, la localidad de Alejandro Roca se ubica en una zona con una P media de 850 mm, con el 80 % de las precipitaciones acumuladas en primavera – verano (Blarasin et al., 2018). Los balances hídricos edáficos muestran en general un régimen no deficitario registrándose los mayores excesos durante primavera-verano, e incluso en algunos otoños. Los índices de aridez y humedad calculados, permitieron determinar que el clima del área de estudio es de tipo subúmedo-húmedo (Blarasin et al., 2018). La zona de estudio está ubicada en plena llanura Chaco-Pampeana Argentina, a orillas del río Cuarto. Teniendo en cuenta los diferentes ambientes hidrogeológicos de la provincia (Blarasin et al., 2014, Fig.3) la zona pertenece a la "Faja fluvial moderna y antigua del Río Cuarto" la cual está caracterizada por formas fluviales, como paleocanales y áreas de llanuras de inundación, bordes de terrazas y zonas de divagación de meandros. Todos estos rasgos están enmascarados por una cubierta de sedimentos eólicos que es más espesa a medida que las formas son más antiguas, es decir alejándose de la actual traza el río Cuarto.

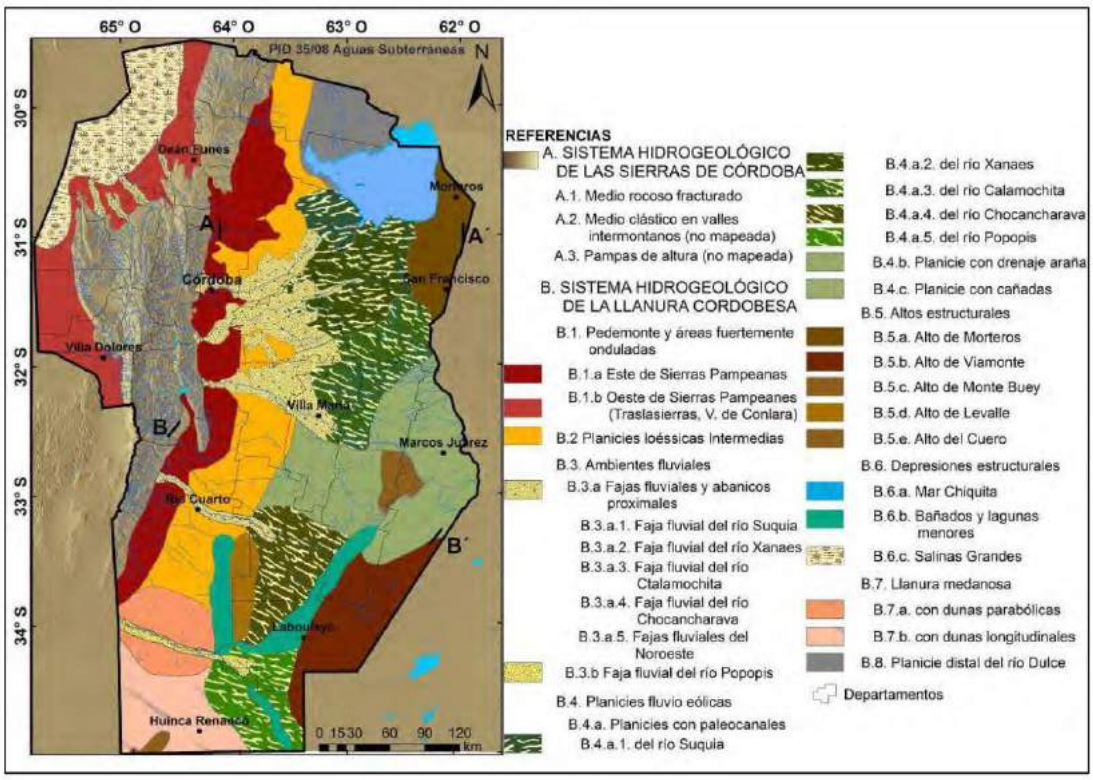


Figura 3. Unidades hidrogeológicas de la Provincia de Córdoba (Blarasin et al., 2014).

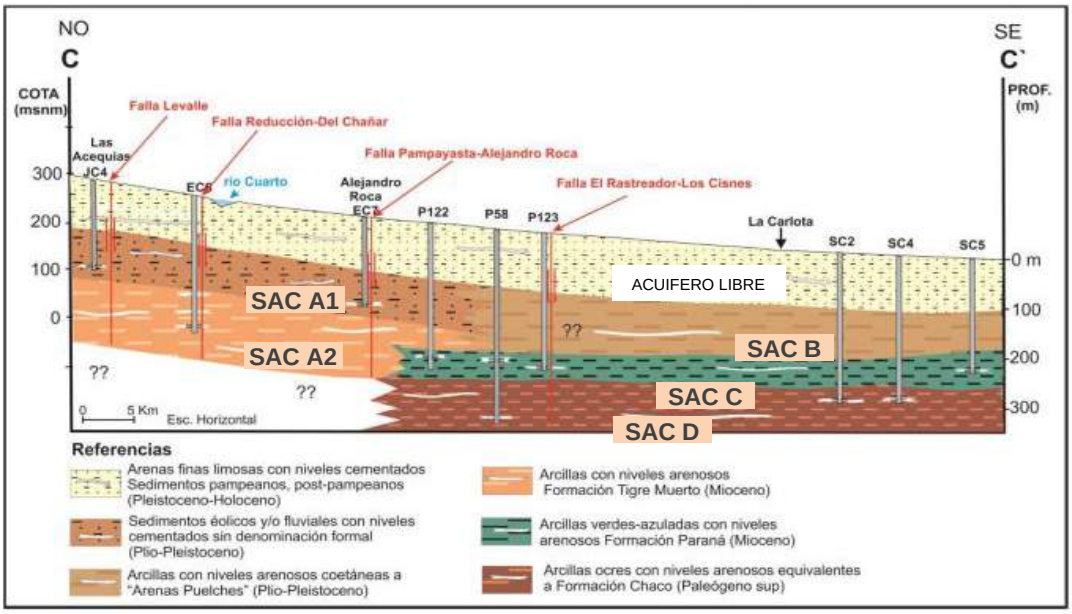


Figura 4. Perfil hidrogeológico regional (Maldonado, 2014). SAC: sistemas acuíferos confinados.

Como se observa en el perfil de la Fig. 4 (Maldonado, 2014) en profundidad se destacan 2 ambientes diferentes de sedimentación con importante influencia en la calidad de agua. Hacia el Oeste se destacan, hasta los 300 m de profundidad, sedimentos de origen continental, mientras que hacia el Este de la localidad de Alejandro aparecen intercalaciones de sedimentos de origen continental con otros de origen marino (color verde en el perfil) de edad Miocena (Fig. 4). En el gráfico se identifica con la sigla SAC los sistemas acuíferos con capas confinadas.

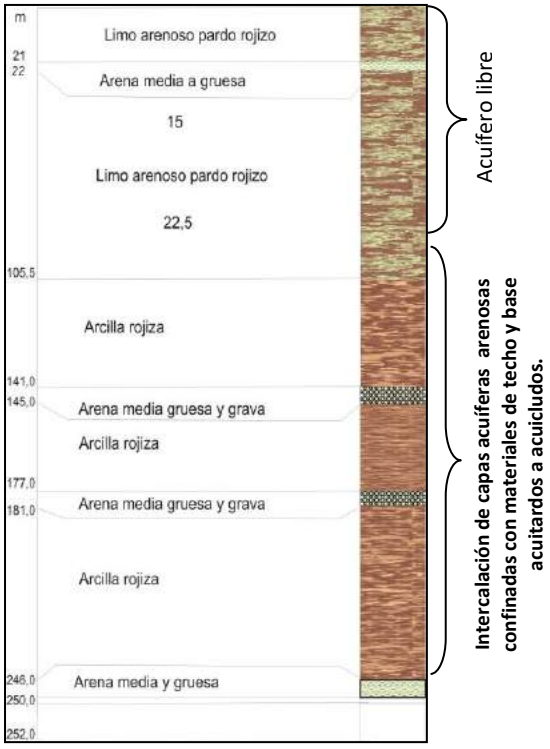


Figura 5. Perfil litológico del subsuelo en Alejandro Roca, perforación P7 de la Cooperativa donde aparecen las capas arenosas confinadas, la de más abajo actualmente en explotación (dato cedido por Cooperativa de agua A. Roca).

En la localidad de Alejandro Roca y alrededores (Blarasin et al., 2001), el agua subterránea se aloja en el acuífero libre o freático y, por debajo del mismo, en diferentes capas acuíferas confinadas. La base del acuífero libre está conformada por sedimentos arcillosos que se ubican a profundidades variables (en el orden de 90 m a 140 m de profundidad). Las capas acuíferas confinadas están formadas por arenas finas, medias y gruesas correspondientes a depósitos fluviales, de espesores entre 5 a 10 metros y están intercaladas con importantes espesores de sedimentos finos (limos, limos cementados con carbonatos y arcillas) que confinan las capas acuíferas en diferente grado. El perfil litológico que se muestra en la Figura 5, corresponde a la localidad de Alejandro Roca (Blarasin et al., 2018). Así, los sedimentos arenosos muy finos limosos con diferente grado de cementación carbonática

dominan hasta aproximadamente los 100 m de profundidad, mientras que más abajo aparecen intercalaciones de capas arenosas que son más gruesas (arenas-gravas), más permeables y buenas portadoras de agua. Es decir, de acuerdo al modelo regional (Blarasin et al., 2014), las perforaciones de la localidad captan del Sistema Acuífero Confinado SAC A_1 (Figura 4). Un ejemplo de muestras areno gravosas, extraídas de capas acuíferas confinadas del SCA A_1, al =este de Alejandro Roca, en la cercana localidad de Acequias, se muestran en la figura 6. Según numerosos antecedentes. los sedimentos eólicos, que dominan en el acuífero libre, tienen una mineralogía típica. Entre los minerales livianos destacan feldespato potásico, cuarzo, vidrio volcánico (en altos porcentaje, más del 50 % en ocasiones), plagioclasa y fragmentos líticos diversos, mientras que los minerales pesados se encuentran muy subordinados (<10%): piroxenos, anfíboles, turmalina, circón, apatito y opacos (Matteoda 2012, entre otros). En el loess también se encuentran óxidos y oxihidróxidos de Fe y Al e hidróxidos amorfos de Fe y Al. En ambientes fluviales, donde los depósitos proceden de removilización de sedimentos eólicos por parte del curso de agua, la mineralogía es similar, mientras que, en depósitos fluviales de texturas gruesas, es decir, paleocauces que denotan condiciones de flujo de alta energía, dominan minerales como feldespato y cuarzo, sobre todo éste último, menos susceptible a la meteorización.

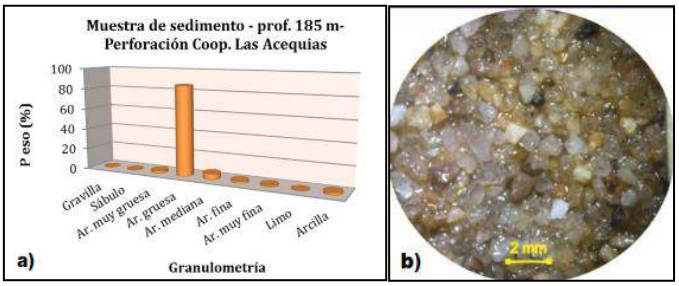


Figura 6. a. Análisis textural de muestra de sedimentos a 185 m de profundidad de perforación de la zona, al oeste de Alejandro Roca, zona La Acequias. **b.** Foto a lupa de la muestra analizada. (Maldonado, 2014).

Si se tiene en cuenta la información local obtenida en informes previos para la localidad (Blarasin et al., 2001) y en el actual relevamiento, puede distinguirse en el mapa de equipotenciales (Fig. 7a) la dirección del agua del acuífero libre NW-SE y en el de conductividad eléctrica del agua (Fig. 7b) valores del orden de 1.300 a 1.700 µS/cm, (equivalente a valores de salinidad de 900 a 1.200 mg/L). En el mapa de la figura 7 se observa además que el agua resultó del tipo geoquímico bicarbonatada sódica.

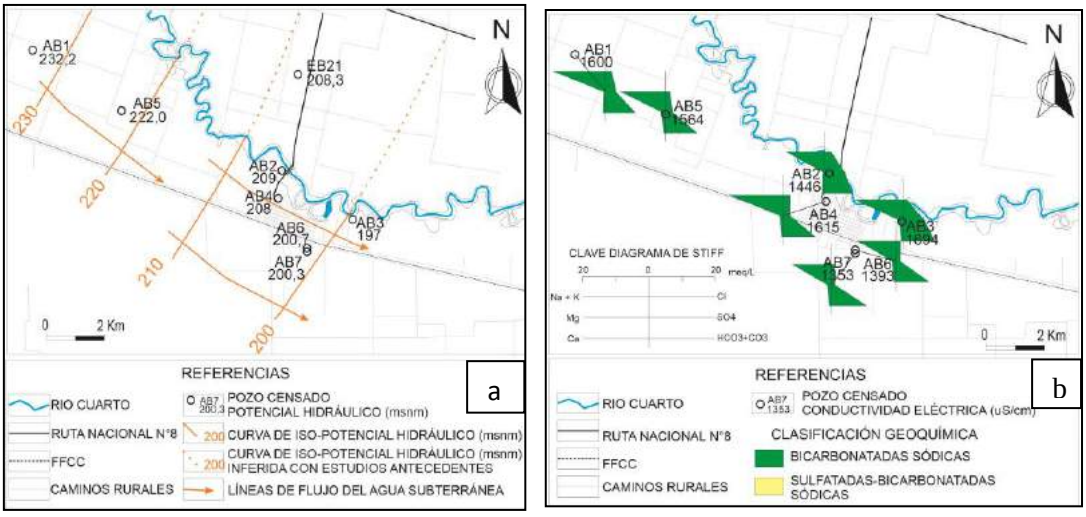


Figura 7. Mapa de características del acuífero libre en Alejandro Roca (2018). **a.** Dirección de flujo del agua. **b.** Conductividad Eléctrica y tipo geoquímico del agua subterránea del acuífero libre.

Tabla 1: Planilla resumen del análisis físico químico e isotópico de aguas. Acuífero libre. Capas confinadas, agua superficial y agua de canillas. Alejandro Roca 2019

CODIGO DE MUESTRA		CE µScm	pH	SDT mg/L	$CO_3^{=}$ mg/L	CO_3H^- mg/L	$SO_4^{=}$ mg/L	Cl^- mg/L	Na^+ mg/L	K^+ mg/L	Ca^{+2} mg/L	Mg^{+2} mg/L	As ug/L	F- mg/L	NO_3^- mg/L	$\delta^{18}O$ ‰	δ^2H ‰
ACUIFERO LIBRE	Mínimo	1353,0	7,9	967,0	0,0	475,0	30,7	40,5	271,0	9,1	6,4	1,0	10,0	1,0	9,0	-5,2	-27,9
	Máximo	1703,0	8,4	1192,0	2,4	650,0	310,1	78,3	392,3	17,9	12,0	12,7	90,0	2,2	135,0	0,0	0,0
	Media	1538,3	8,1	1087,4	0,7	586,4	140,0	59,8	324,1	14,1	8,7	9,1	60,0	1,4	31,1	-2,9	-15,2
	Desvio	134,5	0,2	91,0	1,2	60,7	108,0	13,6	47,5	2,8	2,1	4,1	27,1	0,4	45,9	2,8	14,3
PERFORACIONES COOPERATIVA	Mínimo	782,00	7,46	547,00	0,00	305,00	76,60	20,00	186,00	14,70	3,20	2,90	5,00	0,21	2,00	-5,26	-28,60
	Máximo	1150,00	8,40	805,00	48,50	450,00	181,80	42,90	273,00	17,70	16,80	5,40	80,00	1,80	5,30	-4,91	-26,80
	Media	926,50	7,94	648,25	12,13	365,00	119,75	31,45	214,85	15,83	11,20	4,53	47,50	0,79	4,33	-5,10	-27,43
	Desvio	159,59	0,39	111,90	24,25	63,64	49,94	11,67	39,37	1,37	6,43	1,18	34,28	0,75	1,56	0,14	0,81
TAP WATER	Mínimo	647,0	8,0	453,0	0,0	310,0	123,4	5,7	165,8	16,3	15,2	3,9	0,0	0,0	0,0	-5,4	-27,8
	Máximo	873,0	8,2	611,0	0,0	330,0	166,7	40,0	198,2	16,8	19,2	7,3	0,0	0,0	7,5	-5,0	-26,6
	Media	841,3	8,1	589,0	0,0	317,7	145,2	33,5	176,7	16,5	17,0	5,7	0,0	0,0	5,2	-5,2	-27,4
	Desvio	56,5	0,1	39,5	0,0	6,2	14,3	7,9	10,3	0,1	1,5	1,1	0,0	0,0	1,8	0,2	0,3
MIX		842	7,82	589	0	310	151	34,3	198,2	16,8	17,6	4,9	60	0,22	4,2	-5,19	-27,9
AA2 (agua superficial)		429	8,28	300	0	200	17,7	20	64,7	10,8	20	2,4	5	0,18	13	-3,37	-17,8
AC1 (confinado oriental)		1313	7,79	919	0	277,5	292,3	86,4	186	18,2	50,4	15,6	15	0,13	10	-5,72	-32,4

 ISBN 978-987-1323-66-1

Si bien el contenido salino del agua subterránea es bajo, en el mapa de la Fig. 8 se muestra que hay niveles de As y F que, en general, sobrepasan los niveles aceptables de As y F para consumo humano.

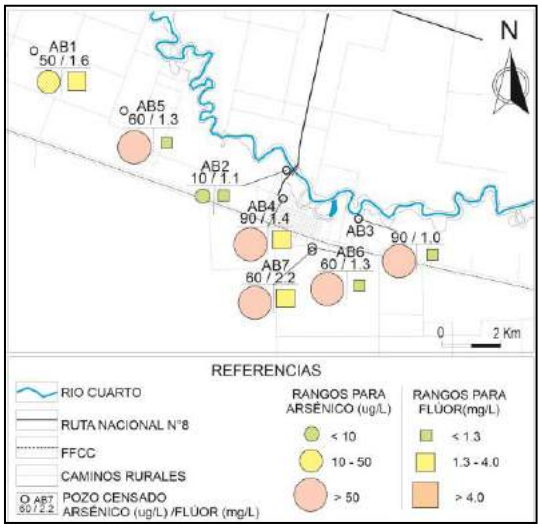


Figura 8. Arsénico y flúor en agua subterránea. Acuífero libre.

Acuíferos confinados

Como se observa en los pozos de la Cooperativa de Agua de Alejandro Roca y otros más alejados que captan de acuíferos confinados (Fig. 9), las líneas de flujo muestran dirección NW-SE. Se destaca que en la localidad el potencial hidráulico de las capas confinadas es menor al acuífero libre. En la zona rural más oriental, las perforaciones AC_1 y AC_2, por su profundidad (250-300m) se interpretan como situadas en el sistema confinado SAC A_2 ya que allí no se llegó a las arcillas verdes miocenas. El agua de las capas confinadas resultó dulce y de tipo bicarbonatada o sulfatada sódica (AC_1, AC_2, P_4, P_6, P_7) (Fig. 10a). Sin embargo, sólo posee agua con valores muy bajos de F y As, la perforación P_7 de la Cooperativa (Fig. 10b) realizada con posterioridad a la exploración del año 2001 (Blarasin et al., 2001), lo cual se vincula al hallazgo de capas acuíferas de granulometría más gruesa, más permeables, de origen continental, cuyas características texturales y mineralógicas justifican la composición química del agua.

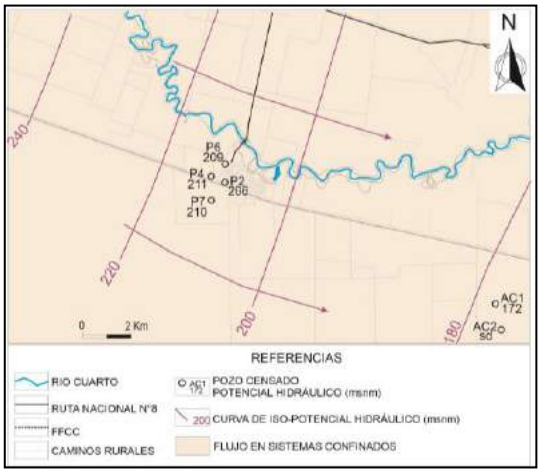


Figura 9. Líneas de equipotenciales y flujo de capas acuíferas confinadas.

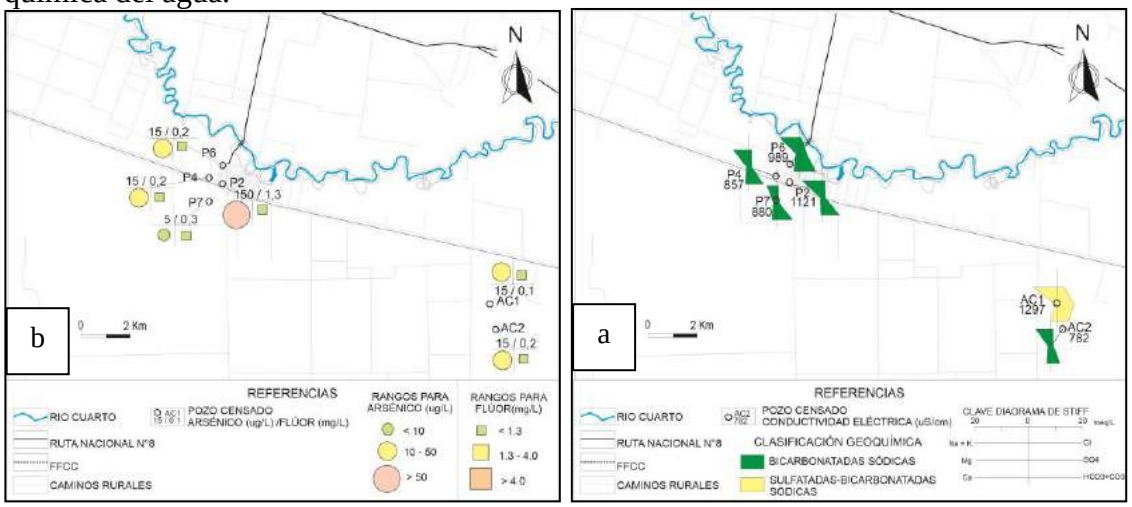


Figura 10. Mapas correspondientes a capas confinadas por debajo de 200 m. **a.** Arsénico y flúor en agua subterránea **b.** Conductividad Eléctrica y tipo geoquímico de agua subterránea.

Aspectos isotópicos

En relación a los aspectos isotópicos del acuífero libre (Fig. 11), todas las muestras resultaron cercanas a la línea meteórica local de Rio Cuarto usada en el Sur de Cba. (LMRC) lo que demuestra el origen del agua subterránea a partir de precipitaciones regionales que se originan principalmente en el frente atlántico. Solo la muestra AA_2 quedó desplazada notoriamente de la recta en un punto que permite trazar una recta de evaporación y se corresponde con el valor isotópico enriquecido del agua superficial (río Cuarto) justamente por procesos de evaporación. Las muestras de agua de las capas acuíferas confinadas quedaron ubicadas cerca también del LML, lo que indica que los sistemas se recargan por las precipitaciones. El agua subterránea de las capas confinadas en explotación en la ciudad de Alejandro Roca mostró valores isotópicos similares al freático, lo que indica su conexión hidráulica. Este aspecto permite reafirmar conceptos previos (Blarasin et al, 2001), tales como el comportamiento observado para el arsénico, cuya variabilidad temporal en las concentraciones para diferentes muestreos en una misma perforación, podían ser explicados por una conexión hidráulica a través de fenómenos de flujo de filtración vertical descendente desde el acuífero freático (con mayor contenido en As). Esto es posible dado que el acuífero freático tiene mayor potencial hidráulico que el confinado, y es probable que incluso los valores más altos de arsénico se vinculen a días de mayor uso y descenso de potencial en los alrededores de la perforación que capta de la capa confinada. Se trata de una situación que será próximamente monitoreada en el tiempo. Por otro lado, la muestra AC_1 de la capa confinada ubicada hacia el Este de la localidad, cuya profundidad es del orden de 250-300 m, muestra valores isotópicos empobrecidos.

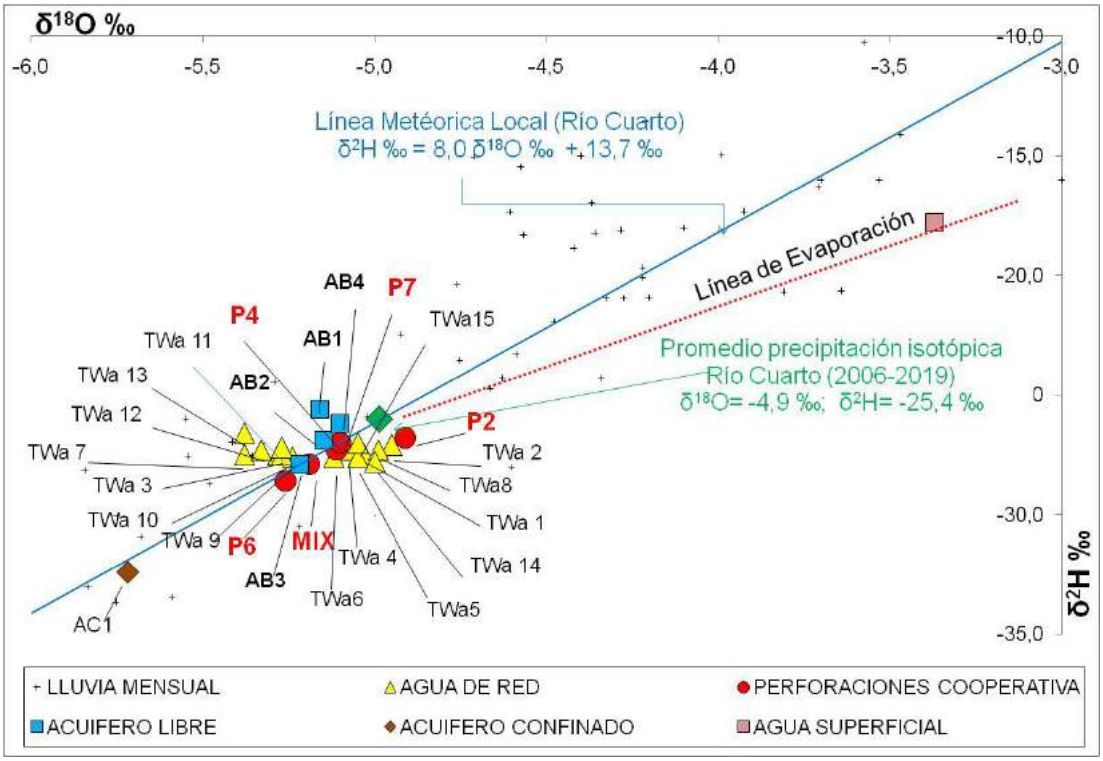


Figura 11. Resultados de isótopos en el municipio de Alejandro Roca, relaciones entre agua de la canilla, agua superficial y subterránea /acuífero libre y confinado)

Estos valores más negativos ($\delta^{18}O$: -5,72 ‰; $\delta^{18}H$: -32,4‰), muy diferentes a los del río y el acuífero libre (Fig. 11), indican que existe una conexión hidráulica limitada a nula entre ellos. Por su similitud con valores isotópicos serranos y/o pedemontanos pueden asumirse inicialmente como un indicador de recarga lejana en las sierras y su periferia e incluso durante condiciones climáticas más frías del Pleistoceno como ha sido probado para otros sectores (Maldonado et al., 2016; Blarasin et al., 2020). Este aspecto debería luego ser examinado con técnicas de datación de aguas subterráneas.

Como se observa en la figura 11, la muestra de agua MIX extraída de la red de suministro de la ciudad (salida del tanque de distribución), producto de la mezcla entre las perforaciones P_4, P_6 y P_7 que se encontraban en funcionamiento en ese momento, quedó en el gráfico alojada entre las mencionadas perforaciones y rodeada de las aguas de canilla. Para establecer con mayor precisión los porcentajes aportados por cada perforación a la mezcla MIX, se realizó una modelación numérica geoquímica aplicando el programa computacional Phreeqc (Parkhurst y Appelo, 2013), donde se contemplan los datos físico químicos e isotópicos de las muestras de las 3 perforaciones que originan el MIX. A través del programa Phreeqc, se han testeado numerosos modelos posibles de los cuales 19 satisfacen las restricciones tenidas en cuenta en el modelo conceptual. Los valores hallados, luego de aplicar procesos de mezcla, y considerando al cloruro como ion conservativo para tal análisis, indican que para alcanzar la composición bicarbonatada sódica del agua de la muestra MIX (solución final), las soluciones iniciales se mezclan en un porcentaje promedio **39/49/12** ($P_4/P_6/P_7$), cuando las tres están en funcionamiento.

CONCLUSIONES

El análisis del área permitió confirmar que el acuífero libre, formado por sedimentos eólicos y fluviales finos, tiene escasas aptitudes de uso para consumo sobre todo por los valores de arsénico, flúor y nitratos, lo que llevó gradualmente al uso de aguas subterráneas más profundas. Los sedimentos arenosos muy finos–limosos que constituyen el acuífero libre, dada la alta superficie específica que poseen y su constitución mineralógica, habilitan procesos de meteorización que aportan elementos químicos al agua como arsénico y flúor. Además este acuífero, por sus características hidráulicas, está directamente conectado con la fase atmosférica por lo que está más expuesto a la llegada de compuestos diversos, entre ellos nitratos derivados del gran uso de fertilizantes y, en menor medida, ganadería en zona rural y de diversas fuentes contaminantes en ámbito urbano, entre ellas los sistemas de saneamiento in situ.

Las capas acuíferas confinadas muestran salinidades bajas dentro de los límites de aptitud de consumo humano, mientras que los valores de los elementos y compuestos químicos mencionados son más bajos. Esto se debe a que los sedimentos de las capas confinadas, genéticamente vinculados a paleocauces del río Cuarto, están constituidos por minerales más inertes (abundancia de cuarzo) por lo que se disminuyen los procesos de meteorización que liberan elementos y compuestos químicos al agua.

Un aspecto importante es que los resultados isotópicos muestran que en la propia localidad de Alejandro las muestras del acuífero libre y de las capas confinadas del SAC A_1, tienen similar firma isotópica, lo que evidencia vínculo hidráulico. Esto podría explicar los ya mencionados valores variables de arsénico en el tiempo, si bien la salinidad total es bastante estable, que respondería a aportes del sistema superior. El proceso necesita mayor monitoreo aunque los resultados hallados hasta el momento llevaron a aconsejar una nueva perforación profunda ubicada hacia el Oeste de la

localidad, para suplementar la actual batería de suministro de la ciudad, donde se espera encontrar, dadas las características hidrogeológicas, aguas más dulces y con menos As.
Desde el punto de vista isotópico se observa que el muestreo de agua de canillas puede ser útil para evaluar mezclas de agua e informa de la composición isotópica del agua subterránea de las capas acuíferas en explotación en el lugar, permitiendo hacer interpretaciones generales del marco hidrológico, sobre todo cuando no hay acceso físico al muestreo de las propias captaciones. Sin embargo, para hacer interpretaciones de aspectos específicos a diferentes profundidades no es de utilidad y es necesario muestrear directamente la fuente de abastecimiento. Además el agua de canillas al pasar por tanques puede dar resultados isotópicos levemente enriquecidos que pueden afectar las interpretaciones. El modelo de mezcla en el tanque de distribución, si bien preliminar y aunque debe ser monitoreado en el tiempo, servirá para indicar qué perforaciones deben usarse más tiempo para el aporte a la mezcla en función de los resultados que se obtengan.

REFERENCIAS

American Public Health Association. (2005). APHA (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. *APHA Washington DC, USA*.

Bécher Quinodóz F., M. Blarasin, A. Cabrera, J. Giuliano Albo, E. Matteoda and Maldonado, 2015. Exploring water for human consumption in rural and urban areas in low suitable hydrogeological environments Rend. Online Soc. Geol. It., Suppl. n. 1 al Vol. 39 pag 32 © Società Geologica Italiana, Roma. DOI10.3301/ROL.2016.63. ISSN2035-8008.

Blarasin M., A. Cabrera y E. Matteoda. 2001. Exploración hidrogeológica Esc. 1:50.000 de la localidad de Alejandro y alrededores para ubicación de nuevas captaciones de agua potable. A solicitud de la Cooperativa de Agua y Servicios Públicos de Alejandro. Informe Técnico UNRC

Blarasin, M., Cabrera, A., & Matteoda, E. (2014). Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. *UniRío. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina*.

Blarasin M., Cabrera A., Felizzia J., E. Matteoda, D. Giacobone y L. Maldonado. 2018. Exploración hidrogeológica para suministro de agua potable en la localidad de Alejandro Roca y entorno rural. Solicitado por Cooperativa de Agua de Alejandro Roca. 30 pag. Informe técnico UNRC.

Blarasin, M., A. Cabrera, I. Matiatos, V. Lutri, L. Maldonado, D. Giacobone, E. Matteoda, F. Becher Quinodoz, J. Giuliano Albo, C. Eric and J. Felizzia, 2020, Application of isotope techniques to enhance the conceptual hydrogeological model and to assess groundwater sustainability in the Pampean plain in Córdoba, Argentina. Isotopes in Environmental and Health Studies, 1-16.65. https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1796658

Cabrera, A., M. Blarasin, F. Bécher Quinodoz, V. Lutri, J. Felizzia, C. Eric, E. Matteoda Y D. Giacobonne. 2019. The Local Meteoric Water Line in the Pampean Plain of Córdoba, Argentina. IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG) e-ISSN: 2321–0990, p-ISSN: 2321–0982.Volume 7, Issue 5 Ser. I (Sep. – Oct. 2019), PP 19-25

Custodio, E. 1993. Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. En Bocanegra y Rapaccini (Eds.), Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Universidad Nacional de Mar del Plata y Consejo Federal de Inversiones, Mar del Plata. pp. 61-78.

Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, *9*(2), 161-167.

Maldonado, L. (2014). *Evaluación hidrogeológica, hidroquímica e isotópica de acuíferos confinados del Sur de Córdoba* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral. UNRC. Inédita).

Maldonado, M. L., Blarasin, M. T., Cabrera, A. E., Panarello, H. O., & Dapeña, C. (2016). Assessing groundwater age in confined aquifers from the central Pampean plain of Córdoba, Argentina. *Radiocarbon*, *58*(4), 833.

Matteoda, E. M. (2012). Evaluación hidrodinámica e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Barreal para establecer línea de base ambiental, con énfasis en la geoquímica del cromo. *Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina*.

Parkhurst, DL y Appelo, CAJ (2013). Descripción de entrada y ejemplos para PHREEQC versión 3: un programa de computadora para especiación, reacción por lotes, transporte unidimensional y cálculos geoquímicos inversos (Nº. 6-A43). Servicio Geológico de EE. UU.

ACTIVIDAD TAMBERA EN EL NORESTE BONAERENSE Y SU IMPACTO EN LOS ACUIFEROS UTILIZADOS PARA CONSUMO

Borzi, G.[a,b], Tanjal C.[a,b], Santucci L.[a,b], Galliari, J.[b,c], Villalba E.[a,b], Stein, J.[b], González M.[b,d], Carol E.[a,b]

[a]*Centro de Investigaciones Geológicas, CIG, CONICET - UNLP, ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, FCNyM Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Centro de Química Inorgánica, CEQUINOR, CONICET – UNLP, ARGENTINA*
[d]*Instituto de Recursos Minerales, INREMI, UNLP-CIC-CONICET, ARGENTINA*

e-mail: gborzi@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

La actividad tambera es uno de los sustentos económicos del noreste bonaerense, donde los productores arrean al ganado hasta galpones de ordeñe y se procede a la extracción de leche dos veces al día. Posteriormente al ordeñe se realiza el lavado del predio y las excretas que fueron generadas por el ganado son drenadas hacia sectores deprimidos en donde éstas pueden infiltrar en el suelo y constituir fuentes de contaminación hacia los acuíferos. El objetivo del trabajo es analizar las características químicas del agua subterránea en las adyacencias de establecimientos tamberos a fin de evaluar si esta actividad afecta la calidad de los acuíferos de la región, cuyo recurso hídrico es utilizado para consumo humano. Con este fin, se recolectaron muestras de agua subterránea, así como también de un efluente derivado del lavado del tambo. Las muestras fueron procesadas en laboratorio, cuantificando elementos mayoritarios y fósforo soluble. De estos elementos, nitratos y fosfatos son componentes que derivan de la degradación de las excretas del ganado, encontrándose en el efluente concentraciones de 113 y 9 mg/L respectivamente. No obstante, en el agua subterránea se registraron valores promedio de NO_3^- cercanos a 30 mg/L y de PO_4^{3-} de 0,26 mg/L. Considerando estos elementos, sólo se observa una incipiente alteración en relación con el contenido de nitratos en el agua subterránea de los acuíferos que afecta a la misma para su uso y consumo. Respecto al fósforo, dado que éste es poco móvil, puede ser retenido en el suelo y en la zona no saturada. El monitoreo de acuíferos en las adyacencias de establecimientos tamberos constituye una herramienta de vital importancia para la gestión de los recursos hídricos ya que permite mitigar las fuentes contaminantes mediante la detección temprana de afectaciones en la calidad química del agua de abastecimiento.

Palabras Clave: Establecimientos tamberos, Recursos hídricos, Calidad del agua.

INTRODUCCIÓN

La provincia de Buenos Aires en Argentina se caracteriza por presentar extensas planicies dedicadas a la actividad agropecuaria. En este sentido, el noreste de dicha provincia constituye un centro tambero, donde el partido de Brandsen (ver Fig. 1) posee una larga historia en lo que respecta a la cría de vacas lecheras, siendo una actividad económica de importancia en el área.

Dentro de las actividades ganaderas, la producción de leche es una de las que mayor cantidad de agua demanda. La fuente de provisión de agua en la región deriva de la

 ISBN 978-987-1323-66-1

explotación del acuífero freático o del acuífero semiconfinado, siendo este último el de mayor caudal (Borzi, 2018). Si bien estos acuíferos poseen una calidad de agua aceptable para la producción lechera, existen problemas de contaminación asociados a deficiencias en la construcción y manejo de las perforaciones, fuentes de contaminación cercanas a los pozos (corrales y lagunas) y desconocimiento por parte de los productores, acerca de cómo manejar el agua y los efluentes (Nosetti et al., 2002).

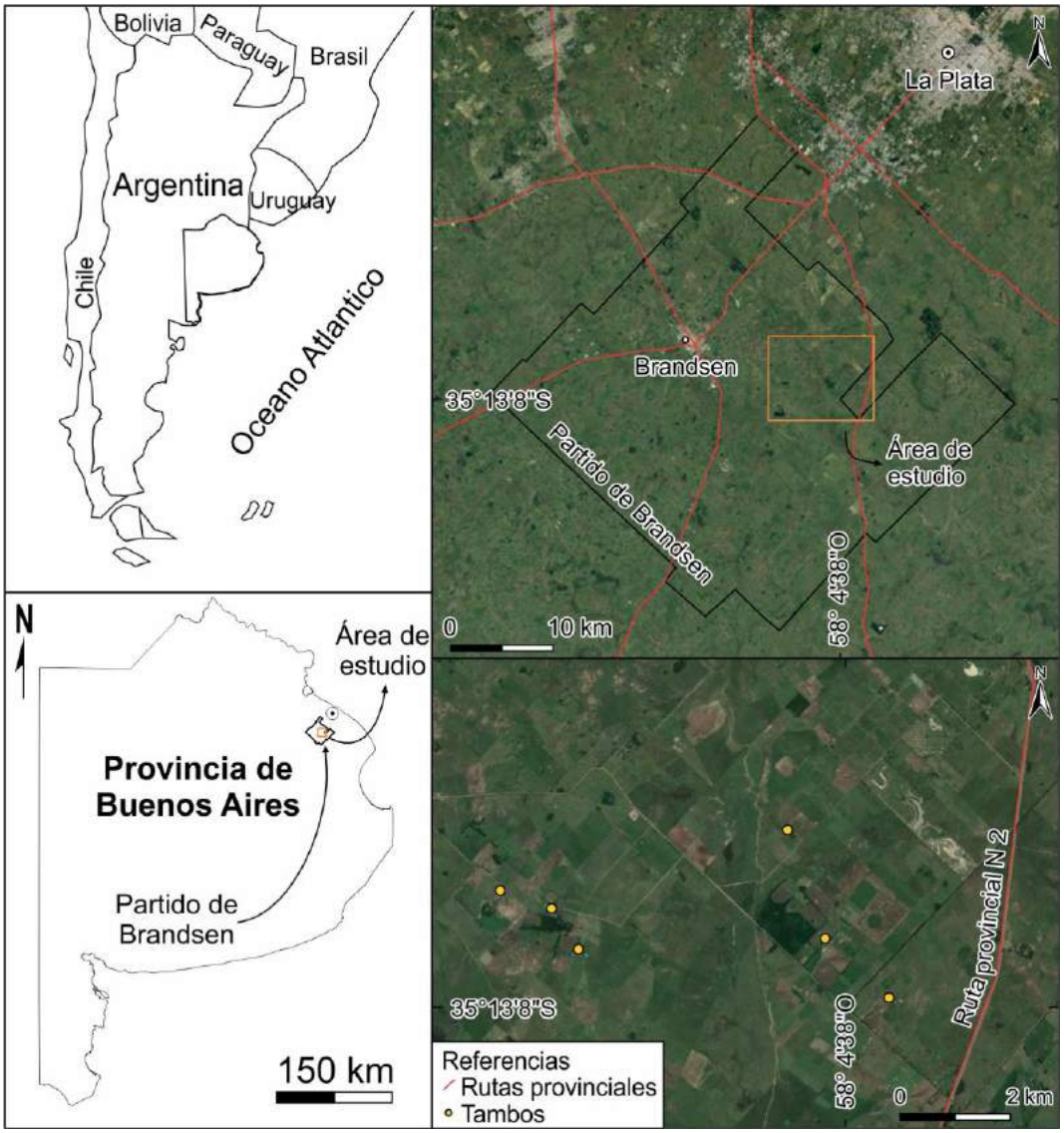


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El ganado es arreado hasta galpones de ordeñe dos veces al día donde se procede a la extracción de leche. Posterior a cada ordeñe, se efectúa el lavado del predio mediante agua a alta presión removiendo así las excretas generadas por el ganado, las cuales son drenadas a sectores deprimidos, pudiendo infiltrar en el suelo y alcanzar a los acuíferos. La degradación de las excretas del ganado genera elevadas concentraciones de nitrógeno, fósforo, azufre, cloruros y carbono orgánico, entre otros elementos en solución (Veizaga, 2015). Estos elementos pueden infiltrar con el agua de recarga alterando la calidad química de los acuíferos utilizados para uso y consumo humano. De

estos elementos, el nitrato es un elemento muy móvil que si se presenta en altas concentraciones en las aguas de consumo puede afectar la salud de los pobladores, así como también al ganado, especialmente las vacas lecheras. En este sentido, altas concentraciones de nitratos en el agua de consumo pueden causar metahemoglobinemia en lactantes y cáncer gastrointestinal en adultos (McDonald y Kay, 1988; OMS, 2004), en tanto que, en el ganado, el nitrato se reduce a nitrito en el rumen generando también metahemoglobinemia (Bavera, 2011). Los fosfatos son otra especie aniónica poco móvil en los sistemas acuíferos. El consumo de agua con elevadas concentraciones de fósforo constituye un potencial riesgo para las personas, debido a que éste puede impedir la absorción del calcio y favorecer la precipitación de fosfato de calcio en el lumen intestinal (Levenson y Bockman, 1994). En base a esto, el objetivo del trabajo fue analizar las características químicas del agua subterránea en las adyacencias de establecimientos tamberos con el fin de evaluar si dicha actividad afecta la calidad de los acuíferos del sector, cuyo recurso hídrico es utilizado no solo para la producción sino también para consumo humano.

MÉTODOS Y MATERIALES

Se efectuaron relevamientos de 6 predios tamberos localizados en las proximidades del km 82 de la Ruta Provincial 2 (ver Fig. 1) en donde se tomaron muestras de agua y se realizó un registro de las condiciones constructivas de los pozos de uso y consumo, así como también de las características propias de cada uno de los tambos.

En base a las perforaciones existentes se diagramó una red de muestreo, la cual constó de 12 muestras de agua subterránea (9 provenientes del acuífero semiconfinado y 3 del acuífero freático), y 1 muestra que corresponde a un efluente derivado del lavado de uno de los tambos. La toma de muestras se realizó según los protocolos recomendados por la APHA (1998), y la misma fue efectuada en el mes de septiembre del año 2019. La conductividad eléctrica y el pH del agua fueron medidos mediante un equipo multiparamétrico portátil marca Lutron modelo WA-2017SD. La determinación de los elementos mayoritarios, nitratos y fosfatos fueron realizadas en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG) mediante métodos estandarizados (APHA, 1998). La concentración de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) fue determinada mediante titulación. Sodio (Na^+) y potasio (K^+) se cuantificaron por absorción atómica con fotómetro de llama marca Crudo Caamaño modelo Ionometer Alfanumérico. Por último, sulfatos (SO_4^{-2}), nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}) fueron cuantificados utilizando un espectrofotómetro UV-Visible de doble haz Shimadzu UV-160A.

Las muestras fueron geolocalizadas mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar espacialmente el tipo de agua, el cual se determinó mediante el uso de diagramas Stiff.

RESULTADOS

Los predios tamberos relevados presentaban variadas dimensiones, siendo algunos de ellos de reducido tamaño (ver Fig. 2a), y otros de una mayor capacidad para albergar vacas durante el ordeñe (ver Fig. 2b).



Figura 2. a. Tambo de pequeñas dimensiones. **b.** Tambo con capacidad de albergar mayor cantidad de ganado.

En todos los casos, los tambos se encontraban techados y con piso impermeabilizado con una capa de hormigón (ver Fig. 2 y Fig. 3 b y e). La limpieza del predio luego del ordeñe consiste en el lavado con agua a presión, tanto de las maquinarias como del piso para eliminar las excretas. Los productos químicos utilizados en el lavado y desinfección son, según informaron los productores, soda cáustica, cloro en polvo mezclado con detergente y ácido muriático en algunos casos.



Figura 3. a. Zanja para evacuar agua de lavado sin impermeabilización. **b.** Tambo de ordeñe donde se puede apreciar el zanjeo para conducir el agua del lavado a sector bajo sin impermeabilización. **c.** Zanja para evacuar agua de lavado con impermeabilización de hormigón. **d.** Bajo excavado e impermeabilizado con hormigón para almacenar momentáneamente el agua de lavado. **e.** Tambo de ordeñe donde se puede apreciar el zanjeo para conducir el agua del lavado a sector bajo impermeabilizado y posteriormente por rebalse a un área más baja sin impermeabilización.

El agua de lavado y las excretas en conjunto con los limpiadores utilizados son conducidas a zanjas para su disposición final en piletas excavadas en áreas topográficamente más bajas (ver Fig. 3). De los sitios relevados, solo uno de ellos contaba con un bajo impermeabilizado con hormigón, en tanto que el resto de los predios no presentaba ningún tipo de impermeabilización. Pese a esto, al colmatarse el sector impermeabilizado, el agua sobrante es dirigida a otro bajo sin impermeabilización.

Respecto a los pozos utilizados para uso y consumo, los mismos evidenciaron una falta de aislación en la parte superior que evite el ingreso directo de contaminantes (ver Fig. 4) y además se encontraban en lugares cercanos al sector donde se drena el agua de lavado. Según se pudo corroborar con los productores, la profundidad de los pozos que extraen agua del acuífero semiconfinado utilizados para la producción es de aproximadamente 60 m, exceptuando 3 pozos que extraen agua del acuífero freático cuya agua es utilizada para consumo humano.



Figura 4. Pozos dirigidos hacia el acuífero semiconfinado en los predios tamberos del área de estudio.

Las muestras de agua subterránea del acuífero semiconfinado presentan valores de pH entre 7,38 y 8,08 y valores de conductividad eléctrica entre 688 y 1360 µS/cm (Tabla I). En todas las muestras analizadas dominan los iones HCO_3^- y Na^+ con valores entre 308,16 y 658,97 mg/L, y entre 128 y 290 mg/L respectivamente, tratándose de muestras bicarbonatadas sódicas (ver Fig. 5).

Tabla I. Resumen de los valores cuantificados para las diversas fuentes de agua muestreadas.

Muestra	pH	CE (µS/cm)	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	PO_4^{3-}
			mg/L									
Acuífero semiconfinado												
n	9											
Máx.	8,08	1360	83,05	658,97	14,55	80,97	80,57	23,80	30,12	290	14,0	0,294
Mín.	7,38	688	31,68	308,16	2,66	12,46	15,70	5,88	15,86	128	7,4	0,195
Promedio	7,83	966	53,27	426,45	7,77	36,24	33,02	11,07	21,88	193	8,9	0,251
DesvEst	0,23	213	15,86	117,42	4,44	25,74	25,48	5,38	4,91	47	2,0	0,041
Acuífero freático												
n	3											
Máx.	8,73	667	41,09	309,90	11,80	12,11	14,06	14,10	21,74	141	11,0	0,311
Mín.	7,76	595	27,40	305,55	5,23	5,31	9,92	3,82	11,41	107	6,1	0,266
Promedio	8,12	630	36,53	308,16	7,82	9,34	11,41	9,30	18,06	126	8,4	0,289
DesvEst	0,53	36	7,90	2,30	3,50	3,57	2,30	5,17	5,77	17	2,5	0,023
Superficial												
Efluente	7,48	1674	0	739,06	116,15	49,83	113,25	12,64	33,51	211	90,0	9,178

Las muestras de agua subterránea del acuífero freático presentan valores de pH entre 7,76 y 8,73 y una conductividad eléctrica que varía entre 595 y 667 µS/cm (Tabla I). Al igual que en las muestras tomadas desde el acuífero semiconfinado, dominan los iones HCO_3^- y Na^+ con valores entre 305,55 y 309,90 mg/L para HCO_3^-, y entre 107 y 141 mg/L para Na^+, mostrando facies bicarbonatadas sódicas (ver Fig. 5). Respecto a los contenidos de NO_3^- y PO_4^{3-}en el acuífero semiconfinado, éstos varían entre 15,70 y 74,70 mg/L y entre 0,195 y 0,286 mg/L respectivamente. Por su parte, en el acuífero freático los contenidos de NO_3^- varían entre 9,92 y 14,06 mg/L y los de PO_4^{3-} entre 0,266 y 0,311 mg/L. En relación con estas concentraciones y los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino (2012) se observa que sólo 2 muestras del acuífero semiconfinado superan en NO_3^- el límite de potabilidad. Cabe aclarar que en dicho código no existen valores de referencia respecto a la concentración máxima del PO_4^{3-} permitida en el agua de consumo. Asimismo, se destaca que no se observa que los establecimientos con mayor capacidad de albergar ganado y que por consiguiente manejan un mayor volumen de excretas, registren en el agua subterránea concentraciones más elevadas de iones mayoritarios o nutrientes (NO_3^- y PO_4^{3-}) que puedan derivar del manejo de los efluentes, en relación con los establecimientos de menores dimensiones.

La muestra de agua superficial de efluente derivado del lavado de un tambo se corresponde con la muestra tomada en el bajo impermeabilizado (ver Fig. 3d). Dicha muestra presenta un pH de 7,48 y una conductividad eléctrica de 1674 µS/cm. Esta muestra presenta los valores más altos en los iones HCO_3^-, SO_4^{2-}, Mg^{2+} y K^+, entre la totalidad de las muestras analizadas, correspondiendo a una muestra bicarbonatada a sulfatada sódica. El contenido de NO_3^- registrado fue de 113,25 mg/L y el de PO_4^{3-} de 9,178 mg/L.

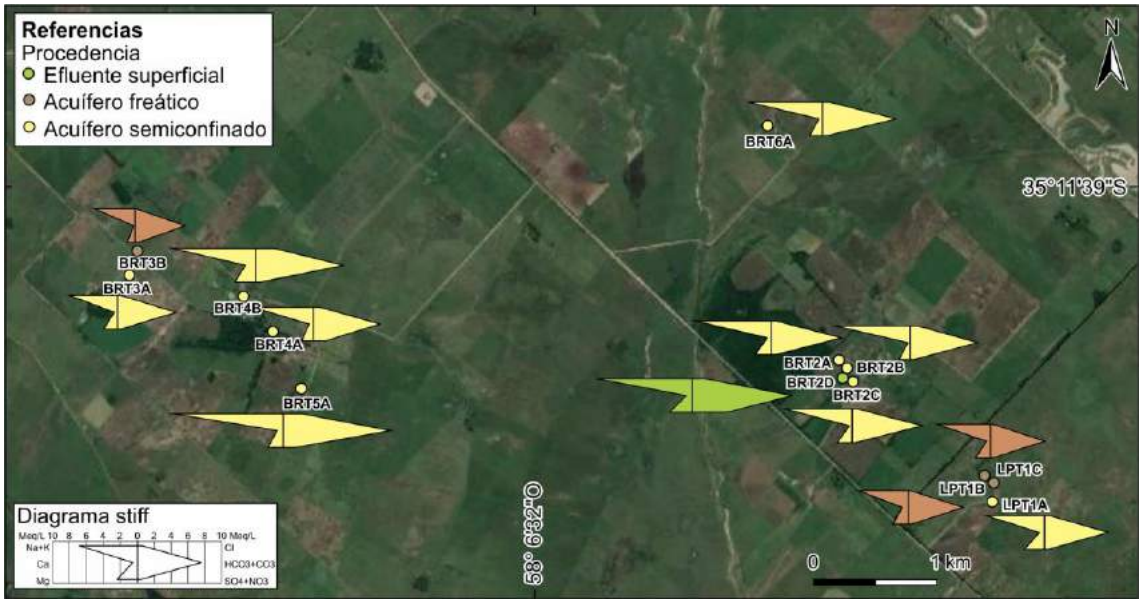


Figura 5. Distribución espacial, representada mediante diagramas Stiff, de las muestras colectadas en los predios tamberos del área de estudio.

 ISBN 978-987-1323-66-1

DISCUSION

La contaminación de acuíferos producto del desarrollo de diversas actividades pecuarias es un escenario común. En general, en los sistemas ganaderos de la Región Pampeana se evidencia que el agua disponible para la producción de leche presenta problemas de contaminación química y microbiológica (Charlón et al., 2012a; Litwin et al., 2016; Cellone et al., 2020; Borzi et al., 2020). Esto se debe frecuentemente a falencias estructurales, como por ejemplo el inadecuado manejo de los efluentes, sistemas semi entubados y deficiencias en las perforaciones de agua, situación que pone de manifiesto la necesidad de tomar precauciones respecto al uso de los recursos hídricos en los predios lecheros (Litwin et al., 2016). Los relevamientos efectuados evidenciaron que dichas falencias estructurales se presentan también en el área de estudio, donde los pozos utilizados para abastecimiento carecen de sello impermeable, y su localización cercana a los galpones de ordeñe puede favorecer el ingreso directo de contaminantes producto de la degradación de las excretas.

Los efluentes provienen de las diversas actividades de las operaciones de ordeño, como ser la limpieza de corrales, sala y máquinas de ordeño, suelen presentar elevados valores de salinidad (Nosetti, et al., 2002). Estas actividades también presentan elevadas concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) principalmente, derivados de las heces y orina del ganado que incrementan el riesgo de contaminación de suelos y aguas (Burón Alfano et al., 2009). De los compuestos que pueden derivar de las excretas se encuentran iones tales como Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, K^+ y PO_4^{3-} (Hudak et al., 2000; Suthar et al., 2009; García et al., 2015). La muestra de efluente obtenida de uno de los tambos analizados en este trabajo presenta el mayor valor de conductividad eléctrica (1674 µS/cm) dentro de todas las muestras obtenidas. En esta muestra se han registrado los valores más altos en los iones HCO_3^-, SO_4^{2-}, Mg^{2+} y K^+, siendo la misma de tipo bicarbonatada a sulfatada sódica. Asimismo, el efluente presenta una alta concentración tanto de PO_4^{3-} (9 mg/L), como de NO_3^- (113 mg/L).

Por su parte, con relación al agua subterránea, sólo el NO_3^- evidenció un leve incremento, tanto en el acuífero freático como en el semiconfinado, respecto a los valores de fondo del área, los cuales son cercanos a 10 mg/L (Borzi, 2018). No obstante, estos valores fueron bajos (Tabla I), y sólo dos muestras obtenidas del acuífero semiconfinado superaron el límite de 45 mg/L de NO_3^- establecido por el Código Alimentario Argentino (CCA, 2012) para consumo humano. Asimismo, no se observa relación entre los contenidos de nitratos y las fuentes de aporte tales como los sitios de ordeño, corrales o áreas con vertido de efluentes. Esto estaría evidenciando que, pese a la falta de sello en las perforaciones de agua, la afectación de los acuíferos es escasa a nula. Es importante destacar esta característica ya que resulta contrastante si se comparan los valores de nitratos obtenidos con los registrados en establecimientos tamberos próximos al área de estudio, donde los NO_3^- superan los 500 mg/L (Cellone et al., 2020). Esta baja a nula contaminación por nitratos podría estar asociada a la impermeabilización de los pisos en los tambos y recolección mediante zanjeo hacia áreas deprimidas, los que constituiría una medida de mitigación de la contaminación en el manejo de efluentes. Predios sin estos cuidados estructurales tienden a generar una mayor superficie de exposición de los suelos a las excretas favoreciendo la infiltración de NO_3^- con el agua de lavado (Cellone et al., 2020).

Respecto al contenido de PO_4^{3-} los valores observados en el agua subterránea fueron bajos, con un promedio de 0,26 mg/L. El fosfato es un compuesto poco móvil que tiende a ser retenido por el suelo y en la zona no saturada (Robles, 1991; Borggaard et

al., 2004), lo cual podría explicar los bajos valores observados en el agua de los acuíferos subyacentes. Asimismo, respecto a esto último, nótese que, si se comparan las concentraciones iónicas en el efluente con las del agua subterránea, estas últimas son considerablemente inferiores. Esto evidencia que la zona no saturada estaría cumpliendo un rol de importancia en la protección de los acuíferos subyacentes (Hernández, 2001), reteniendo otros iones además del PO_4^{3-}.

CONCLUSIONES

Los acuíferos estudiados registran escasa a nula contaminación relacionada a especies iónicas derivadas de la actividad tambera, encontrándose a excepción de dos muestras, todos los puntos monitoreados dentro de los límites permitidos por el Código Alimentario Argentino. Las falencias estructurales observadas en las perforaciones de agua tales como falta de aislamiento y sello impermeabilizante no estarían afectando en la actualidad la calidad del agua, no obstante, es necesaria su adecuación en un futuro inmediato. El agua de lavado de los tambos, excretas y productos de limpieza, que es volcada en sectores deprimidos sin ningún tratamiento previo, constituyen focos de contaminación. Sin embargo, la escasa a nula contaminación destaca la importancia de la zona no saturada como atenuante de los contaminantes, así como también se resalta la impermeabilización de los pisos de los galpones como medida de mitigación a estos focos.

Si bien los resultados obtenidos no indican en general la existencia de problemas en el agua de consumo, el monitoreo de acuíferos en las adyacencias de establecimientos tamberos es una práctica que debe llevarse a cabo regularmente para asegurar la calidad de la misma. Esto constituye una herramienta de vital importancia para la preservación y gestión de los recursos hídricos, ya que permite la detección temprana de contaminantes y contribuye a mitigar las fuentes de contaminación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la FCNyM - UNLP por los fondos aportados para la realización de este trabajo mediante el Proyecto PRIBA y a los productores tamberos del sector por la excelente predisposición para trabajar en conjunto.

REFERENCIAS

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).

Borggaard, O.K., Szilas, C., Gimsing, A.L. y Rasmussen, L.H. Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma*, vol 118, no.1-2, 55-61 (2004).

Bavera, G. A. Aguas y aguadas para el ganado. *Editorial Imberti.* 4ta edición (2011).

Borzi, G. Influencia de la actividad antrópica en la geohidrología de la cuenca del río Samborombón, Tesis doctoral inédita, La Plata, Universidad Nacional de La Plata (2018).

Borzi, G. E., Jovic, N., Villalba, E., Stein, M. J., Tanjal, C., y Santucci, L. Influencia de las actividades agropecuarias intensivas en la hidrogeoquímica del acuífero freático en un sector de la cuenca alta del río Samborombón (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Revista del Museo de La Plata*, 5(2), 467-474 (2020).

Burón Alfano, V., Questa, G., Herrero, M. A., Orlando, A. A., Flores, M., y Charlón, V. Potencial de reutilización de los residuos provenientes de tambos comerciales para la fertilización de recursos forrajeros. *InVet*, vol. 11, núm. 2, 85-92 (2009).

Cellone, F., Carol, E., Pugliese, I., Córdoba, J., Butler, L., y Lamarche, L. Nitrate pollution in dairy farms and its impact on groundwater quality in a sector of the Pampas plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-7 (2020).

Charlón, V., y Herrero, M. A. Aptitud del agua para diferentes usos en tambos de las cuencas lecheras de Argentina, *II Jornadas del Agua en Agroecosistemas*, CETA FCV, UBA, Buenos Aires, Argentina (2012a).

Charlón, V., Herrero, M.A., Cuatrin, A. Contaminación del agua subterránea por nitratos en sitios intensificados de predios lecheros. *Revista Argentina de Producción Animal*, 32 (1) (2012b).

Código Alimentario Argentino. Capítulo XII, Artículos: 982 al 1079-Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas (2012).

García, A., Fleite, S., Ciapparelli, I., Pugliese, D., Weigandt, C. y De Iorio, A. Observaciones, desafíos y oportunidades en el manejo de efluentes de feedlot en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ecología austral*, vol. 25, no 3, 255-262 (2015).

Hernández, M. A. La importancia de la Zona No-Saturada en la hidrología de llanuras. In *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (Vol. 53) (2001).

Hudak, P.F., Videan, N. y Ward, K. Nitrate and chloride concentrations in the High Plains Aquifer, Texas. *International Journal of Environmental Studies*, vol. 57, no. 5,563-577 (2000).

Levenson, D. y Bockman, R. A review of calcium preparations. *Nutrition reviews* (1994).

Litwin, G., Giménez, G., Alvarez, H., Esnaola, I., Centeno, A., Moretto, M., y Almada, G. Indicadores de sustentabilidad en tambos comerciales de la cuenca lechera pampeana argentina. *Paraná: INTA* (2016).

McDonald A. T. y Kay D. Water resources: issues and strategies. Harlow, UK: *Longman Scientific and Technical*, (1988).

Nosetti, L., Herrero, M. A., Pol, M., Maldonado May, V., Iramain, M. S., y Flores, M. Cuantificación y caracterización de agua y efluentes en establecimientos lecheros. Demanda de agua y manejo de efluentes. *InVet*, *4*(1), 37-43 (2002).

Organización Mundial de la Salud. Guidelines for Drinking Water Quality (2004).

Robles, C. Transformaciones y traslocaciones del fósforo como indicadores del desarrollo del suelo. *Suelo y Planta*, vol. 1, 793-800 (1991).

Suthar, S., Bishnoi, P., Singh, S., Mutiyar, P. K., Nema, A. K., y Patil, N. S. Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, India. *Journal of hazardous materials*, vol. 171, no. 1-3, pp. 189-199 (2009).

Veizaga, E.A. Estudio de la dinámica del nitrato en el suelo proveniente de la actividad ganadera intensiva. Tesis doctoral inédita, Santa Fe, Universidad Nacional del Litoral. (2015).

USO DE ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL AGUA DE SUMINISTRO DOMÉSTICO PARA OPTIMIZAR EL MODELO HIDROGEOLÓGICO EN RÍO CUARTO (CÓRDOBA ARGENTINA)

Cabrera A.[a], Blarasin M.[a], [b], Lutri V.[a,b], Giacobone D.[b], Matteoda E.[a], Eric C.[a] y Felizzia J.[a]

[a]*Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA*
[b]*CONICET. Dpto. Geología. UNRC, ARGENTINA*

e-mail: acabrera@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

El uso de agua de suministro doméstico es complejo y en muchas ciudades se obtiene de diversas fuentes de agua con "firmas" isotópicas diferentes que permiten definir origen e interacciones entre sistemas naturales y artificiales. Si bien la información isotópica proporcionada por el agua de canillas hogareñas no es tan directa como aquella de la fuente ambiental que la provee, brinda noción sobre el origen y sobre su transporte, por lo que su muestreo puede ser, en muchos casos, más ventajoso, dada la dificultad de acceso a algunas obras de captación. En Río Cuarto, la segunda ciudad más poblada de Córdoba, el suministro doméstico procede de aguas subterráneas y, en la actualidad, el Ente que regula el uso y manejo del agua, necesita abordar estudios hidrogeológicos sobre dinámica, cantidad y calidad de agua para abordar nuevos emprendimientos. El objetivo del trabajo es efectuar la evaluación isotópica para definir origen y características de la recarga del sistema de aguas subterráneas y su relación con el agua de suministro de red domiciliaria para optimizar el modelo hidrogeológico que permita dar mayor sustentabilidad al uso del recurso. Se emplearon metodologías hidrogeológicas convencionales e isotópicas. Los isótopos estables $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ del agua subterránea evidenciaron valores más enriquecidos en la ciudad, mostrando vínculo de recarga con las lluvias locales. El agua de la zona de la galería filtrante, área a preservar teniendo en cuenta que allí se proyectan nuevas obras de captación, mostró valores isotópicos más negativos, lo que indicó una fuerte recarga influenciada especialmente por el sector del abanico aluvial del río Seco ubicado en el piedemonte de Sierras de Comechingones. Por la gran correlación con las fuentes de aporte, el análisis isotópico de agua de canillas permitió confirmar que su uso puede otorgar datos útiles en estudios urbanos.

Palabras Clave: Geoquímica, Isótopos, Origen, Recarga, Canillas, Acuífero

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Como resultado del rápido crecimiento urbano no planificado, la mayor vulnerabilidad al cambio climático, y las prácticas de gestión del agua relativamente insuficientes, muchas ciudades enfrentan problemas de escasez de agua, contaminación de cuencas, suministro inadecuado de servicios, e incremento de inundaciones, que afectan de manera directa la calidad de vida y las perspectivas económicas de su población (Banco

Mundial, 2012). El agua cumple un papel fundamental en la agenda de crecimiento ecológico como un requisito esencial para la salud humana, el desarrollo económico, y la sustentabilidad ambiental. Para ello, el conocimiento científico sobre el origen y recarga de los distintos sistemas hidrológicos, así como el de las conexiones hidráulicas entre ellos, es sumamente importante y se convierte en la base fundamental para un uso sustentable de los recursos hídricos utilizados. Del mismo modo es vital evaluar características del agua de suministro para actividades agrícolas, industriales, producción de energía hidroeléctrica, entre otros, para el manejo y uso responsable. El suministro de agua por redes a las canillas hogareñas, en términos de cantidad y calidad, está directamente relacionado con la salud humana y las actividades de la vida diaria (Yamanaka y Yamada, 2017; Sánchez-Murillo et al., 2020). La Iniciativa de Agua Azul para Ciudades Verdes del Banco Mundial busca abordar estos aspectos y propone un enfoque concreto que es la "Gestión Integral de Aguas Urbanas" con el fin de apoyar a los actores municipales a enfrentar estos retos de agua urbana de manera más limpia, más eficiente, más resistente y más equitativa (Banco Mundial, 2012). En áreas de rápida urbanización, cada vez se requieren más obras para mejorar el suministro sustentable de los servicios de agua, esto implica no solo generar sistemas de gestión (inversión, coordinación, tratamiento) sino también planificar los elementos del ciclo de aguas urbanas y la gestión de cuencas (GWP 2011). En este contexto el Banco Mundial (2012) propone integrar los servicios de aguas urbanas (en estrecha relación con sus dinámicas de desarrollo), con el contexto más amplio del conocimiento hidrogeológico de la cuenca hidrográfica (Banco Mundial, 2012).

En áreas urbanas, el uso de agua para el suministro doméstico es complejo y en muchos lugares se obtiene de diversas fuentes (subterránea, superficial o mezcla de ambas) con firmas isotópicas diferentes que pueden usarse para definir mejor el origen, las vías y las interacciones entre los cuerpos de agua que se están utilizando. Por ejemplo, los isótopos estables del agua se pueden utilizar para comprender las relaciones entre los consumidores de agua y las fuentes aportantes para desarrollar estrategias vinculadas a fugas en los sistemas de distribución utilizados para el suministro doméstico, así como sistemas de alcantarillado defectuosos que lixivian hacia los acuíferos urbanos, todos aspectos que pueden aportar a una mejor gestión del uso del recurso. La mezcla artificial de aguas de diversos orígenes propagará las "firmas" isotópicas de la fuente de agua hacia las redes de suministro. El agua de canillas en los hogares probablemente refleja características integradas de procesos hidrológicos regionales y de las propias actividades humanas. Una ventaja de muestrear agua de canillas es que es más accesible que desde otras fuentes ambientales, como precipitaciones, aguas subterráneas y ríos. Aunque la información isotópica proporcionada por el agua de canilla no es tan directa como las mencionadas fuentes ambientales, el análisis de su composición isotópica proporcionaría información sobre las señales isotópicas de las fuentes de agua iniciales e incluso sobre su transporte (Zhao et al., 2017). Bowen et al. (2007) presentaron el primer mapa isoscape nacional de agua de canillas en EEUU y observaron que puede ser una herramienta útil para identificar y caracterizar los problemas regionales de los recursos hídricos dentro del complejo sistema hidrológico humano.

La ciudad de Río Cuarto de 170.000 habitantes (INDEC, 2010), es la segunda ciudad más poblada de Córdoba y se ubica al sur de la provincia (Fig. 1). El abastecimiento doméstico está totalmente cubierto por agua subterránea extraída del acuífero libre. En la actualidad, el Ente Municipal de Obras Sanitarias (EMOS) que regula el uso y manejo del agua en la ciudad, pretende realizar nuevas instalaciones para la extracción

de aguas subterráneas y para cumplir con esta finalidad es necesario abordar diferentes aspectos hidrogeológicos relacionados con la cantidad y calidad del agua. Aunque estudios previos han permitido definir un modelo general del funcionamiento hidrogeológico regional (Blarasin et al., 2014), están apareciendo nuevas preguntas, especialmente algunas relacionadas con las jerarquías de flujo de aguas subterráneas, su relación con los sistemas de aguas superficiales, la contaminación, las edades del agua y la sustentabilidad del uso de aguas profundas, y especialmente si las reservas de agua son sustentables para el crecimiento de la ciudad. Al respecto, es común que los gestores (provinciales y municipales) y usuarios del agua se preocupen por la disponibilidad de agua, especialmente en los períodos secos, los volúmenes que pueden ser extraídos, la calidad y aptitud de las aguas subterráneas de diferentes acuíferos, etc.

En este marco, surge el objetivo de este trabajo de efectuar una evaluación isotópica que permita definir el origen y características de la recarga del sistema de aguas subterráneas y su relación con el agua de suministro de red hogareña en la ciudad de Río Cuarto para optimizar el modelo hidrogeológico que permita dar mayor sustentabilidad al uso del recurso.



Figura 1. Mapa de ubicación

FUENTES DE ABASTECIMIENTO A LA RED DE AGUA POTABLE DE RÍO CUARTO

En Río Cuarto, 100.000 habitantes fueron abastecidos exclusivamente con agua subterránea a través de una galería filtrante que fue construida en 1931 y utilizada para recolectar agua del acuífero libre (500 m^3/h). La galería está ubicada en las márgenes del río Cuarto, a 15 kilómetros al NO de la ciudad de Río Cuarto. Desde esta galería el agua subterránea es transportada por gravedad a través de un acueducto hacia un tanque de almacenamiento para su posterior distribución. Como resultado del aumento de la población, se sumaron las primeras perforaciones realizadas en 1965 en el ambiente hidrogeológico fluvial en el centro de la ciudad. Desde entonces se han construido numerosas perforaciones en el mismo entorno fluvial, incluidas las ejecutadas junto a la galería filtrante para mejorar su servicio dada su obsolescencia parcial. A la fecha, la EMOS (Ente Municipal de Obras Sanitarias) es responsable de más de 30 perforaciones utilizadas para el suministro doméstico y la dotación de la ciudad está en el orden de 300 L/hab/día.

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima de la zona es mesothermal subhúmedo, con una precipitación promedio anual de 799 mm, las cuales se concentran principalmente (74%) en primavera-verano. Los frentes de humedad más importantes proceden de la cuenca del Amazonas y del Océano Atlántico, por lo que las precipitaciones disminuyen progresivamente desde el NE y E

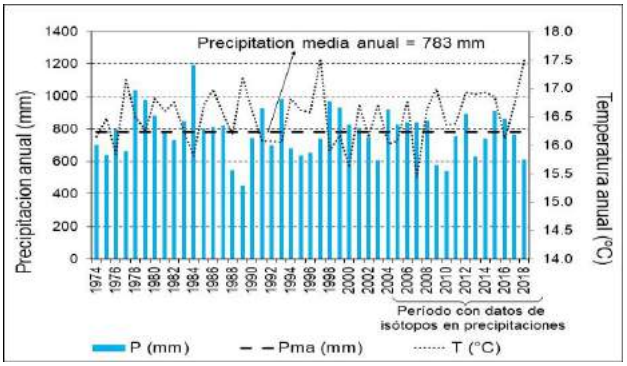


Figura 2. Temperatura media anual y precipitaciones. Río Cuarto.

 ISBN 978-987-1323-66-1

hacia el SW, hasta llegar a las Sierras Pampeanas (Capitanelli, 1979, González et al., 2009). La evapotranspiración potencial media anual es de 827 mm (Fig. 2), lo que determina un déficit en el balance hídrico del suelo del orden de 40 mm, aunque los balances seriados de paso de tiempo mensual permiten observar excesos hídricos coincidentes con los períodos más húmedos.

Caracterización Geológica e Hidrogeológica

La cuenca a la que pertenece la zona de Río Cuarto y ambiente circundante se extiende desde las sierras de Comechingones (al sur de sierras Pampeanas) hasta la llanura mal drenada en los Bañados del Saladillo. La cuenca alta se caracteriza por la presencia de rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrica y Paleozoica en las que se desarrolla la red de drenaje de alta densidad de cursos. En el piedemonte, la mayoría de las aguas de los arroyos serranos se infiltran en el subsuelo contribuyendo a la recarga del sistema regional de aguas subterráneas. La infiltración se ve facilitada por la permeabilidad relativamente alta de los depósitos sedimentarios cuaternarios, que consisten en arenas y gravas de origen aluvial y coluvial y, subordinadamente, de arenas limosas muy finas de origen eólico. En cuenca media y baja, el río Cuarto atraviesa la llanura pampeana, que se caracteriza por formaciones fluvio-eólicas y fluviales de edad neógena y cuaternaria (Blarasin et al., 2014).
El acuífero libre estudiado, de un espesor aproximado de 80 m, está alojado en los sedimentos eólicos y fluviales cuaternarios, cuyas características se pueden discriminar en tres unidades hidrogeológicas (Blarasin et al., 2014; Blarasin et al., 2020 a): UHA de origen fluvial (arenas y gravas, con conductividades hidráulicas (K) del orden de 50 m/d), UHB de origen eólico (arenas muy finas limosas, K = 1 m/d) y UHC de origen fluvio-eólico (ambiente de transición, con valores de K intermedios) (Fig. 3).

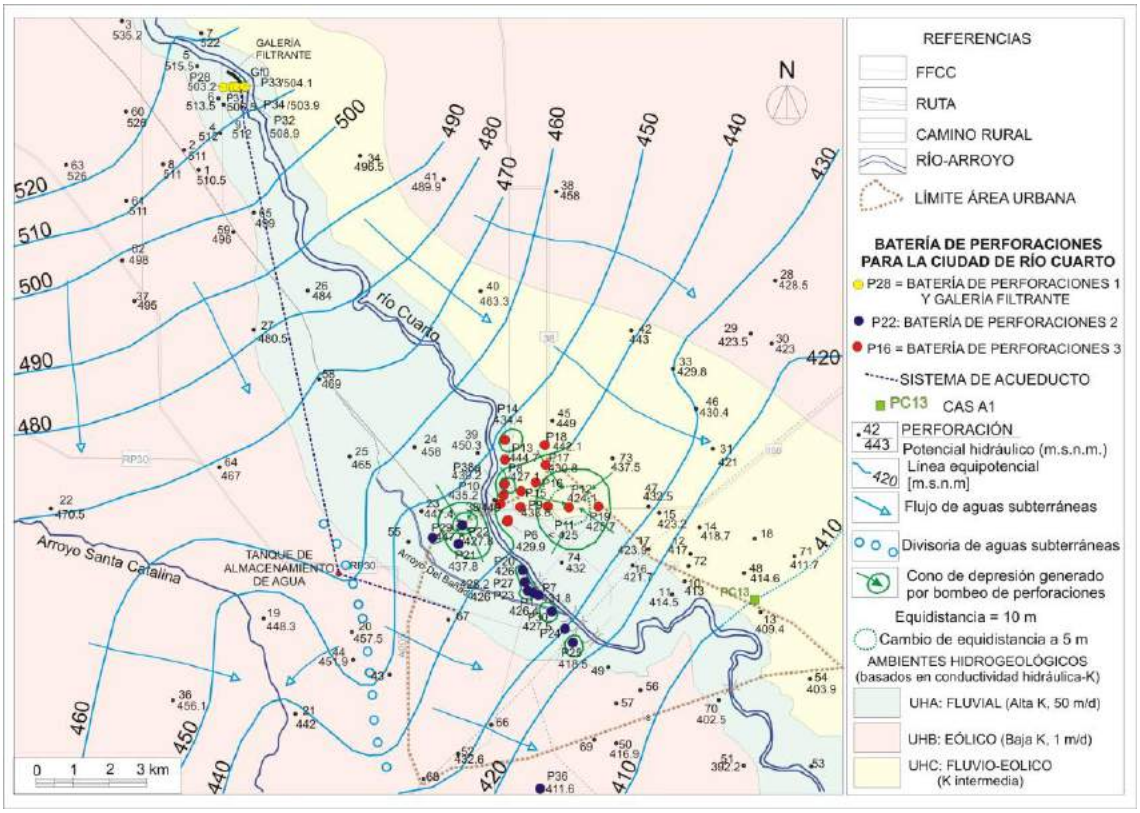


Figura 3. Unidades hidrogeológicas y líneas equipotenciales del acuífero libre (Blarasin et al., 2020 b).

El agua subterránea fluye, con velocidades promedio del orden de 0,2 m/d, del Noroeste al Sureste, controlado por las características litológicas y topográficas (Fig. 3), y en general es influente respecto al río Cuarto en la mayoría de los tramos del río aportando su caudal de base, aunque en algunos tramos se observa comportamiento inverso. La profundidad del nivel freático es variable entre 1 y 20 m, siendo recargado por precipitaciones locales en un promedio del 10-15% de las lluvias anuales en los sedimentos eólicos y en casi el 30% en los materiales fluviales, lo que se considera suficiente para reponer las reservas regulares o fluctuantes del acuífero (Giacobone et al., 2018). Los valores de CE en el agua subterránea variaron entre 199 y 2.140 µS/cm (Fig. 4), es decir se trata de aguas dulces. Son del tipo geoquímico bicarbonatadas cálcicas en los ambientes fluvial y fluvial-eólico, donde la infiltración y la velocidad del flujo del agua subterránea son relativamente más altas y, por lo tanto, los procesos de meteorización que aportan iones al agua son limitados, y bicarbonatadas sódicas en el ambiente eólico, donde la velocidad del agua subterránea es menor, lo que permite procesos de interacción agua-roca más prolongados, como disolución de sales, hidrólisis e intercambio iónico (Blarasin et al., 2014; Blarasin et al., 2020 a).
La base del acuífero libre está formada por una capa arcillosa de hasta 50 m de espesor, por debajo de la cual está presente el sistema acuífero confinado SAC A1 que se extiende hasta los 160 m de profundidad. El agua de este SAC muestra baja salinidad (CE ~ entre 300 y 823 µS/cm) y es del tipo geoquímico bicarbonatada sódica (Blarasin et al., 2014).

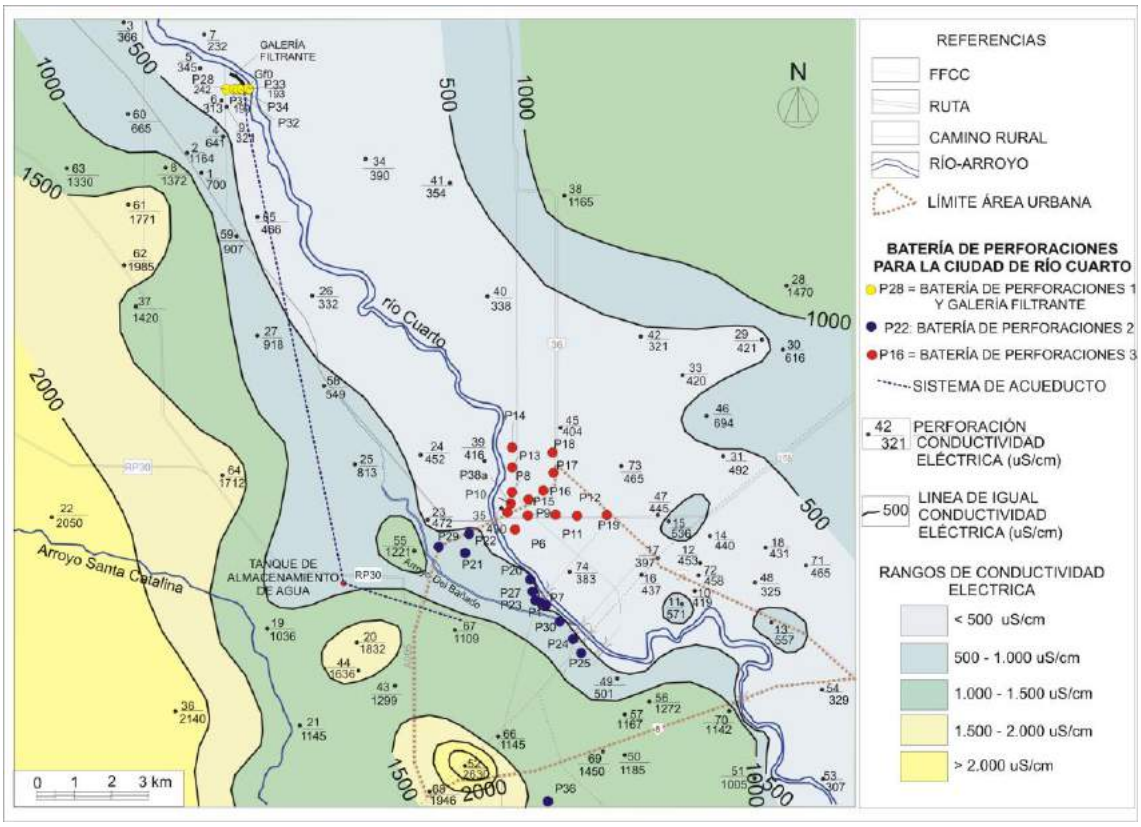


Figura 4. Conductividad eléctrica del agua subterránea (Blarasin et al., 2020 b).

MÉTODOLOGÍA EMPLEADA

La investigación se desarrolló sobre la base del análisis de imágenes de satélite (Google Earth) y cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50.000 y, en la recopilación y análisis de información antecedentes (Blarasin et al., 2003 y 2014). Las campañas de muestreo se realizaron entre 2019 y 2020 y consistieron en la toma de muestras de agua subterránea (28 perforaciones del acuífero libre y en 4 del sistema acuífero confinado (SAC A1)), de agua corriente de red de la ciudad de Río Cuarto (29 muestras) y agua del río Cuarto y arroyos serranos (12 muestras). El agua de canillas se muestreó por la noche en todas las casas seleccionadas. Del total de muestras recogidas, se seleccionaron 64 muestras para análisis de isótopos estables de la molécula de agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$): 26 del acuífero libre, 2 del río, 4 arroyos serranos, 3 del acuífero confinado (todos pozos artesianos) y las 29 del agua de canillas (Fig. 5). A los fines del presente trabajo, las baterías de perforaciones del EMOS, se han denominado BP1 (galería filtrante y perforaciones adyacentes), BP2 (margen norte del río) y BP3 (margen sur del río). Se midieron in situ: pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y temperatura (T), con sonda multiparamétrica Hanna. Los iones mayoritarios (CO_3^{2-}-HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^+, K^+) fueron determinados por Métodos Estándar (APHA, 2005) en el laboratorio del Dpto. de Geología-UNRC.

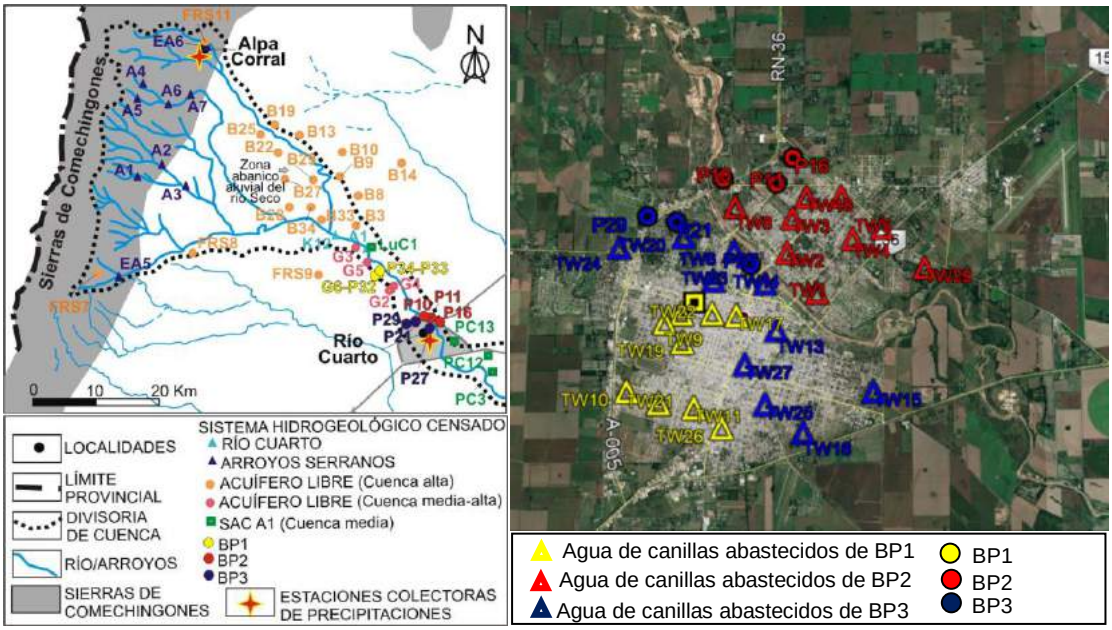


Figura 5. Ubicación de sitios censados: A) Muestreo regional. B) Muestreo de agua de canillas en la ciudad de Río Cuarto

Los análisis de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ fueron realizados en el Centro de Geología de Costas UNMDP. Los valores de isótopos estables se expresaron como δ (‰) en relación con el estándar internacional VSMOW (δmuestra (‰) = ($R_{muestra}/R_{estándar}$ - 1) x 1000) y las incertidumbres reportadas fueron de ± 0,15‰ y ± 1‰ para $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, respectivamente. Para el análisis de los resultados isotópicos obtenidos de los diferentes sistemas hidrológicos se cuenta con dos rectas de aguas meteóricas locales, las correspondientes a las estaciones Alpa Corral (en sectores serranos) y la de la ciudad de Río Cuarto (Cabrera et al., 2019; Blarasin et al., 2020 b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el diagrama isotópico convencional ($\delta^{18}O$ vs $\delta^{2}H$) que se muestra en la Figura 6, se puede observar que las muestras de agua de arroyos serranos (cuenca alta) muestran valores isotópicos más negativos, como resultado del efecto continental y de la altitud (Cabrera et al., 2017 y 2019). Las muestras del río Cuarto exhiben, en general, valores isotópicos más positivos, desviándose de las 2 líneas meteorológicas locales (Alpa Corral y Río Cuarto), que es indicativo de fraccionamiento isotópico debido a la evaporación. Por otro lado, las muestras de agua del acuífero libre del área pedemontana (aguas arriba de la galería filtrante, en el abanico aluvial del Río Seco, Figura 5) mostraron valores isotópicos similares o ligeramente inferiores al promedio de las precipitaciones recogidas en la localidad de Alpa Corral y los arroyos serranos, indicando la interacción entre los cuerpos de agua (arroyos serranos que se infiltran y aportan al acuífero pedemontano). Las muestras de agua subterránea de la batería BP1 (que incluye el área de la galería filtrante) fueron influenciadas por el agua subterránea del piedemonte, como lo demuestra la composición isotópica similar entre ellas ($\delta^{18}O$: -5,67 a -5,24 ‰; $\delta^{2}H$: -30 a-26,5 ‰). En la ciudad, esta fuente de agua procedente de BP1 quedó isotópicamente vinculada a las aguas de canilla del centro-oeste urbano, que fuera la primera zona de abastecimiento de la galería. El agua de canillas de las casas ubicadas en la margen sur del río mostró valores isotópicos entre -5,40 a -5,10 ‰ para $\delta^{18}O$ y -29,0 a -26,0 ‰ para $\delta^{2}H$, similar con la batería BP2, demostrando que esas casas son suministradas principalmente por esta fuente. Los valores isotópicos de la batería BP3 ($\delta^{18}O$: -5,17 a-5,10 ‰; $\delta^{2}H$: -27,6 a-27,1 ‰), que se ubica en el margen norte del río, estuvieron cerca del valor isotópico promedio de la recta meteórica local de Río Cuarto, lo que indica la importancia de la recarga del acuífero a partir de las precipitaciones locales en este sector, probablemente en relación a la importante

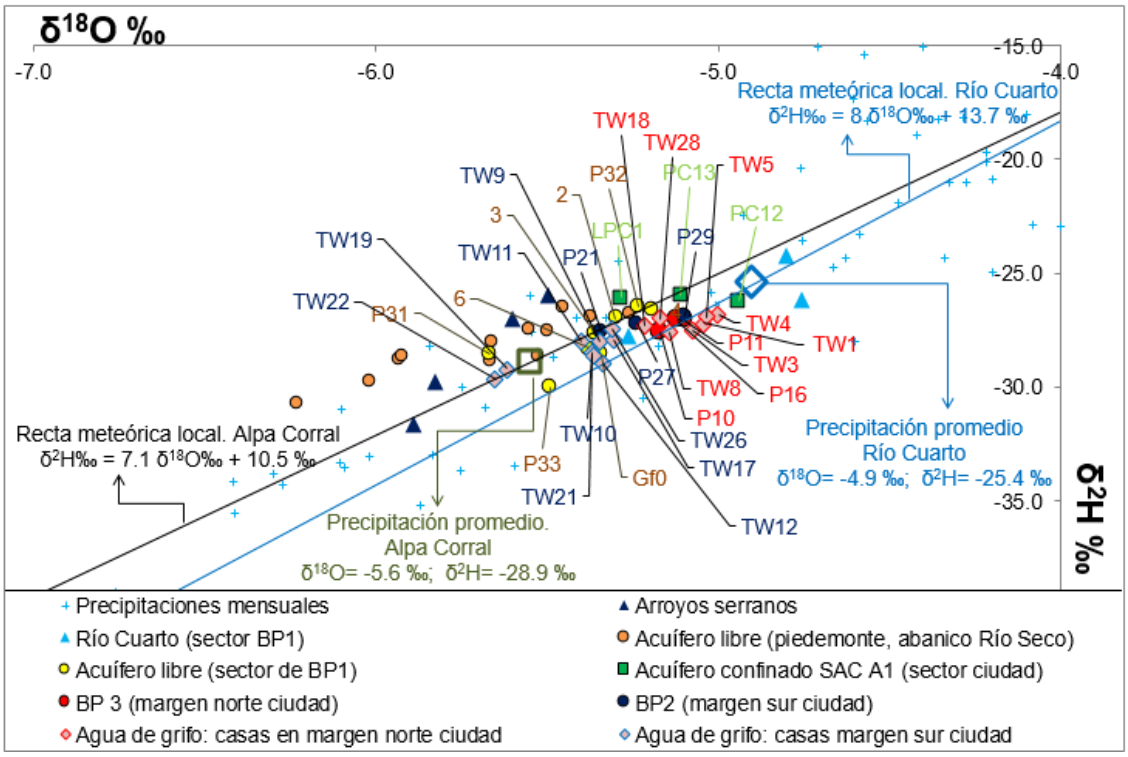


Figura 6. Diagrama $\delta^{18}O$ vs $\delta^{2}H$ para sistemas de agua superficial y subterránea

permeabilidad de sedimentos dominantemente gruesos, que facilitan la recarga. El agua de canillas de las casas ubicadas en la margen norte del río mostró valores isotópicos similares ($\delta^{18}O$: -5,15 a-5,0 ‰; $\delta^{2}H$: -27,6 a-26,8 ‰) a las perforaciones de la batería BP3, indicando su procedencia. Los valores isotópicos de las muestras PC12 y PC13 recolectadas de pozos artesianos (sistema acuífero confinado SAC A1) fueron graficados en un sector intermedio ($\delta^{18}O$: -5,30 a -5,10 ‰, $\delta^{2}H$: -26,0 ‰) entre la precipitación promedio de las estaciones de Río Cuarto y la de Alpa Corral, cerca de la recta meteórica de Alpa Corral, lo que muestra que la composición isotópica del agua subterránea sería el resultado de la mezcla entre la lluvia local y el flujo de agua subterránea profunda procedente del área de piedemonte. Sin embargo, la muestra LPC1 mostró una composición isotópica similar a las muestras del acuífero libre del piedemonte, aspecto que concuerda con su ubicación en el propio sector pedemontano y una clara vinculación con la recarga del acuífero libre en los sectores más altos topográficamente, donde el acuífero libre tienen mayor potencial hidráulico que la capa confinada explotada por LPC1.

CONCLUSIONES

La red de agua potable de la ciudad de Río Cuarto está abastecida exclusivamente de agua subterránea del acuífero libre dulce de buena calidad, lo cual está fuertemente relacionado con la alta conductividad hidráulica del acuífero, que disminuye los procesos geoquímicos naturales que suministran solutos al agua subterránea.

Por otro lado, los isótopos estables del agua permitieron definir el origen y las áreas de recarga del sistema acuífero que se constituye en la fuente de suministro de agua para la ciudad. Así, los isótopos estables de agua evidenciaron valores más enriquecidos en la ciudad de Río Cuarto que en el piedemonte y sectores serranos, siendo las perforaciones de la batería de bombeo BP3 y parcialmente algunos de la BP2, los que poseen aguas con mayor enriquecimiento isotópico, mostrando el vínculo de este sector del acuífero con la recarga de precipitaciones locales. La batería 1 y la galería filtrante mostraron aguas con valores isotópicos más negativos, lo que indicó una fuerte influencia de la recarga del área de piedemonte, y especialmente del sector del abanico aluvial del río Seco, área que debe ser preservada, teniendo en cuenta que se proyectan nuevas obras de captación en ese sector.

El estudio de isótopos de agua de canillas, que se realiza por primera vez en Córdoba, por la gran correlación con las fuentes de aporte, conocidas en este caso, indica que son de gran utilidad para evaluar aspectos isotópicos si no se tuviera acceso a las posibles perforaciones de abastecimiento.

Por otro lado, el acuífero libre estudiado, por las características hidrogeológicas descriptas y teniendo en cuenta las actividades urbanas y rurales de la región, es susceptible a procesos de contaminación, lo cual puede derivar en la presencia de contaminación química y/o bateriológica, que puede afectar la calidad de suministro doméstico, cuyo estudio debe profundizarse. De los aspectos presentados surge la necesidad de generar una alta prioridad a la protección del acuífero en la región.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue subsidiado por los proyectos de investigación: F33024 de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA-Viena), PICT 474 del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y PPI de la Universidad

Nacional de Río Cuarto. Se agradece muy especialmente al EMOS y a la gente involucrada en la toma de aguas de las canillas de la ciudad de Río Cuarto, por permitir tan gentilmente el acceso a las muestras.

REFERENCIAS

APHA, AWWA and WPCF. American Public Health Association & Eaton, Andrew D & Water Environment Federation & American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater: 21st, Washington (2005).

Banco Mundial. Blue water, Green cities: An initiative from the World Bank for integrated urban water management. *Gestión integral de aguas urbanas*. (2012).

Blarasin M., Cabrera A., Paris M. y E. Matteoda. Aplicación del análisis factorial y cluster al tratamiento de datos hidrogeoquímicos en la Hoja Río Cuarto, Córdoba. III Congreso Argentino de Hidrogeología. UNL. Tomo II, 309-318. (2003).

Blarasin M., Cabrera A. y E. Matteoda. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. UniRío Editora. (2014).

Blarasin M., Cabrera A., Matiatos I., Lutri V., Giacobone D., Becher Quinodoz F., Matteoda E., Eric C., Felizia J. and J. Giuliano Albo. Characterization of groundwater dynamics and contamination using isotope techniques to evaluate domestic supply in an urban area. Enviado para su publicacion en revista internacional. (2020a)

Blarasin M, Cabrera A., Matiatos I., Lutri V., Maldonado L., Giacobone D., Matteoda E., Becher Quinodoz F., Giuliano J., Eric C. and J. Felizzia. Application of isotope techniques to enhance the conceptual hydrogeological model and to assess groundwater sustainability in the Pampean Plain in Córdoba, Argentina. *Isotopes in Environmental & Health Studies*. Special Issue of Groundwater in Latinamerican and Caribean. (2020 b)

Bowen G., Ehleringer J., Chesson L., Stange E. & Cerling T. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States. *Water Resources Research*, 43(3). (2007).

Cabrera A, Blarasin M and Maldonado L. Groundwater age and hydrothermalism of confined aquifers in the Argentine Pampean plain. *Geothermal Energy*. 5(1). 6. (2017)

Cabrera A., Blarasin M., Bécher Quinodoz F., Lutri V., Felizzia J., Eric C., Matteoda E. y Giacobonne D. The Local Meteoric Water Line in the Pampean Plain of Córdoba, Argentina. *Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG).* Vol.7, Issue 5:19-25. (2019).

Capitanelli R. (1979). Geografía física de la provincia de Córdoba. Vázquez JB, Miatello RA, Roqué ME, editor. Buenos Aires: Editorial Boldt; p.45-138.

Giacobone D., M. Blarasin, E. Matteoda, V. Lutri, L. Maldonado, A. Cabrera, F. Becher and J. Giuliano (2018). Assessment of groundwater volumes and quality suitability for different uses. *International Journal of Engineering and Applied Sciences.* Vol.5, Issue-4

González M., Dapeña C., Cerne B., et al. (2009). Verification of the geographical origin of modeled airmass trajectories by means of the isotope composition of rainwater during the SALLJEX experiment. Environ Fluid Mech; 9:409-425.

GWP (2011). Hacia la Gestión Integral de Aguas Urbanas, Proyecto de Perspectivas. *Sociedad Mundial del Agua.*

Sánchez-Murillo R., Esquivel-Hernández G., Birkel C., Ortega L., Sánchez-Guerrero M., Rojas-Jiménez L. & Castro-Chacón L. (2020). From mountains to cities: a novel isotope hydrological assessment of a tropical water distribution system. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1-18.

Yamanaka T. & Y. Yamada (2017). Regional Assessment of Recharge Elevation of Tap Water Sources Using the Isoscape Approach. *Mountain research and development*, 37(2),198-205.

Zhao S., Hu H., Tian F., Tie Q., Wang L., Liu Y. & Shi C. (2017). Divergence of stable isotopes in tap water across China. *Scientific Reports*, 7, 43653.

GEOCHEMICAL AND VOLUMETRIC CONTRAST OF LAVA FLOWS AND SCORIA CONES IN THE NEGROS DE ARAS VOLCANIC FIELD, NORTHERN CHILE

Cafaggi S.[a], Ureta G.[b,c], Aguilera M.[b,d], Vilches M.[b,d], Torres I.[b], Aguilera F.[b,c,d], Tranne C.A.[a], Dinelli E.[a], and Zimmer M.[e]

[a]*Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, via Zamboni 67, 40126 Bologna, ITALY*
[b]*Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[c]*Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, CHILE*
[d]*Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, CHILE*
[e]*Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, GERMANY*

e-mail: g.ureta.alfaro@gmail.com

ABSTRACT

Negros de Aras is a monogenetic volcanic field located in the Central Volcanic Zone of the Andes in northern Chile, close to the active Socompa volcano. This volcanic field is compound by 22 lava flows vents, and 45 scoria cones, of which 20 exhibit lava flows associated. Negros de Aras is situated 26 km towards the north from Socompa volcano, at a zone dominated by N-S trending ridges. Lava flows located in the north and northeast zones of the volcanic field have been dated at < 1.5 and 0.6 ± 0.4 Ma, respectively. The geochemical evolution and volume erupted by this volcanic field were determined by fieldwork, geochemical and morphometric analyses. Geochemically, lava flows, and scoria cones display a range from 54.28 to 64.47 wt.% SiO_2, respectively. Both lava flows and scoria cones show a compatible trending of major elements as Fe_2O_3, TiO_2, MgO, whereas K_2O and Na_2O present an incompatible trending. Trace elements display elevated Sr/Y and La/Yb ratios, high Sr values, depleted Y and HREE values, absence of an Eu anomaly, Nb and Ti negative anomalies, and relative enrichment LILE and LREE. The lava flows volumes were estimated based on a TanDEM-X 12 m resolution using the ArcGIS™ software. The total bulk volume of the lava flows and scoria cones are 7.82 km^3 and 0.11 km^3, respectively. The geochemical features suggest that the magma has fractionated garnet ± amphibole in its origin, with a low degree of contamination during its ascents to the surface. Besides, considering the small-volume magma batches, it is possible to suggest that the magmas did not have any prolonged stopping on the ascent to the surface. The content of volatiles dissolved, and the ascent rate of these magmas played an essential role in the definition and the change of dominant eruptive styles.

Keywords: Monogenetic volcanism, Small-volume volcanoes, Effusive and explosive eruptions, Socompa volcano, El Negrillar.

INTRODUCTION

The term volcanic field is generally used to indicate a group of closely spaced volcanoes, although this definition is not strictly genetic, and is usually assumed that these volcanic fields are composed of small monogenetic volcanoes (Cañón-Tapia, 2016).

Usually, monogenetic volcanic fields comprise a large number of volcanic clusters aligned, in which every volcanic edifice are the product of a single eruptive episode (Martí et al.,

2017). Although, this type of volcanism is the most widespread on the Earth. However, the factors that regulate the eruptions in this type of volcanism are still little known (Martí et al., 2017). The variety of morphologies found in these fields is attributable to several factors involved in the formation of the monogenetic volcanoes, which can be internal- (magma composition, gas content, rheology, volume) and/or external- (regional and local stress fields, stratigraphic and rheological contrasts in substrate rock, hydrogeology) factors (Valentine and Gregg, 2008; Németh, 2010; Martí et al., 2011). Magmas in monogenetic systems rise from great depths through simple conduits with little crustal interaction and not accumulate in medium-depth magma chambers (Smith and Németh, 2017). It rises to the surface is dependent on the regional lithospheric stress field (Menand, 2008; Maccaferri et al., 2010; Gudmundsson, 2011; Maccaferri et al., 2011; Menand, 2011; Bolós et al., 2015).

Negros de Aras is a monogenetic volcanic field located in the Central Volcanic Zone (CVZ) of the Andes, Antofagasta region, northern Chile (see Fig. 1). Negros de Aras is situated north of the Socompa volcano and near its avalanche (see Fig. 1). This area is characterized by the presence of the Monturaqui-Negrillar-Tilopolozo aquifer (Anderson et al., 2002). This volcanic field is compound by lava flows and scoria cones with compositions from basaltic andesites to andesite (Hoffman, 2011), which exhibit evidence of Strombolian and phreatomagmatic eruptions (Aguilera et al., 2020).

The objective of this work is to propose a magmatic ascent model that characterizes the Negros de Aras volcanic field, focusing on the textural and geochemical evidence obtained in this work, to explain the origin of this volcanic field and the link of this volcanism with the mafic monogenetic volcanism of the Puna Norte.

GEOLOGICAL SETTING

Negros de Aras is a monogenetic volcanic field comprised of 22 lava flows and 45 scoria cones, which is located in the Chilean Central Andes between Salar de Atacama basin and the Socompa active volcano (see Fig. 1).

This monogenetic volcanic field is situated into the south-western margin of a major volcano-tectonic province known as the Altiplano-Puna Volcanic Complex (APVC; de Silva, 1989; see Fig. 1a). Based on geophysical evidence, this province is related to a large portion of the middle crust that may be partially molten below the APVC, known as the Altiplano-Puna Magma Body (APMB; Ward et al., 2017; see Fig. 1a). The volcanism associated with the APVC is related to a thick crust that at the Negros de Aras area is 56 km thick (Yuan et al., 2002), which presents two melt storage zones in the upper and lower crust known as MASH (mixing, assimilation, storage, homogenization) zones (de Silva and Kay, 2018; Wörner et al., 2018).

From structural point of view, the Negros de Aras area is dominated by a compressive tectonic regime (Kuhn, 2002), which is characterized by N-S trending ridges that are associated with a set of reverse faults and extend to the southern margin of the Salar de Atacama basin (Ramírez et al., 1991; González et al., 2009; James, 2019; see Fig. 1b).

Negros de Aras volcanics are deposited over a basement composed by: i) quartz arenites, arenites, and limonites of the Zorritas Formation (Devonic – Lower Carboniferous; Cecioni and Frutos, 1975; Urzúa, 1989; Isaacson et al., 2010). ii) Sandstones, conglomerates, and siltstone lenses of the Purilactis Formation (Upper Cretaceous-Tertiary; Hartley et al., 1992). iii) Stratified gravels with coarse sand lenses interspersed with lithic ignimbrites, rhyolitic pumice, and volcanic agglomerates that underlie andesitic and dacitic lavas of the Salín Formation (Miocene-Pliocene; Ramirez, 1988). iv) Pliocene Tucúcaro Ignimbrite (3.2 ± 0.3 Ma, $^{40}K/^{40}Ar$ in biotite; Ramírez and Gardeweg, 1982). Besides, in this area is confined the

Monturaqui-Negrillar-Tilopozo acquifer (MNT; Anderson et al., 2002; see Fig. 1), which covers a volume of 1010 m^3 (Anderson et al., 2002) and is developed mainly on volcanic ash and ignimbritic deposits (Rissmann et al., 2015).

The Negros de Aras volcanic products display petrographic and geochemical characteristics typical of volcanic arcs and of magmas derived from the mantle and influenced by the interaction of magmas with the continental crust during their ascent towards the surface (Hoffman, 2011). Two radiometric datings have been carried out in Negros de Aras (<1.5 and 0.6 ± 0.4; $^{40}K/^{40}Ar$ in biotite; Ramírez and Gardeweg, 1982). On the other hand, some lava flows and scoria cones of the Negros Aras volcanic field are covered by the Socompa debris avalanche (see Fig. 1). Thus, the age of this volcanic field can be constrained with the age of the Socompa debris avalanche (7000 years; 14C in pumice; Ramirez, 1988).

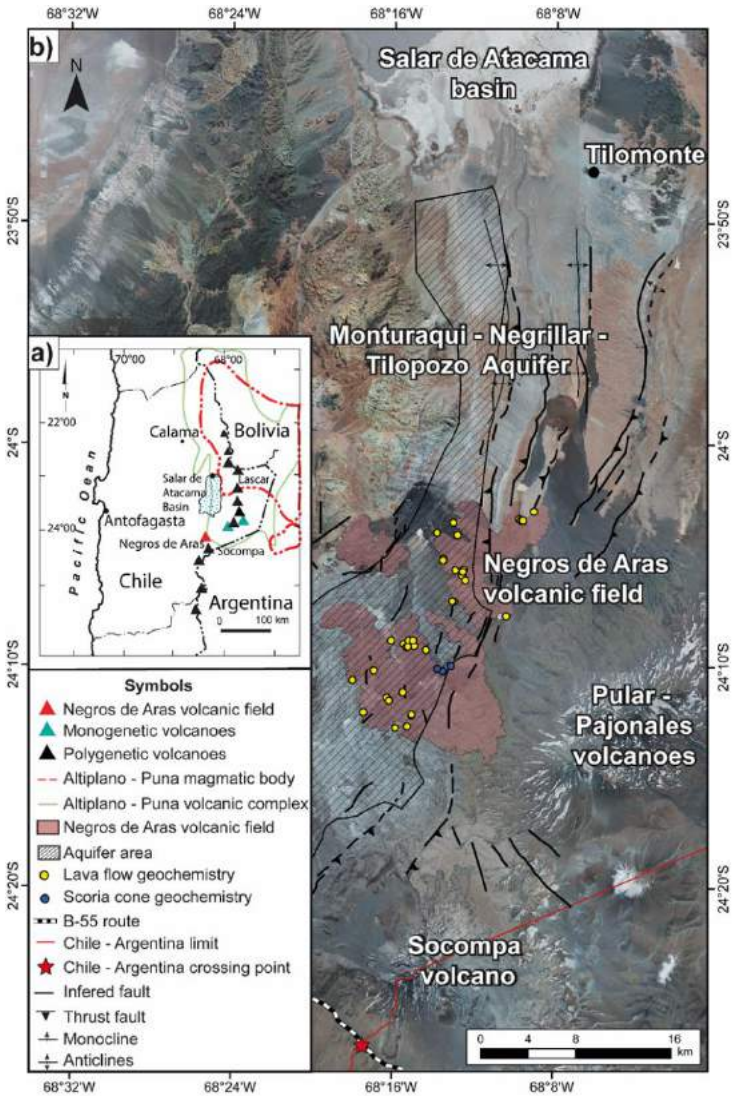


Figure 1. a) Location of Negros de Aras volcanic field in the Central Volcanic Zone (CVZ) of the Andes, Antofagasta region, northern Chile. The light green line displays the extension of the Altiplano-Puna Volcanic Complex (APVC) in the CVZ (de Silva, 1989). The red dashed-line indicates relative extensions of the Altiplano-Puna Magma Body (Zandt et al., 2003). b) Location map of Negros de Aras volcanic field, showing the main surrounding stratovolcanoes. The pink area displays the extension of the Negros de Aras volcanic field. The blue circles indicate the sample location of the geochemistry analysis in the scoria cones, while the yellow circles correspond to the sample location of the geochemistry analysis of the lava flows. Structural information was taken from Kuhn (2002), Aron et al. (2008), González et al. (2009) and James (2019), while the extension of the aquifer was taken from Anderson et al. (2002).

METHODS

Fieldwork was carried out to define different volcanic units and volcanic structures and to collect samples of the different volcanic centers. A total of 7 hand-rock samples with no signs of alteration were collected for petrographic analysis (thin sections). These samples were prepared in the Geological Science Department at Bologna University (Italy). The abundance of minerals (type of crystals, groundmass, and vesicles) was done with a petrographic microscope Nikon Alphaphot at Bologna University (Italy). Crystal sizes were defined following González (2008) as phenocrysts (>0.50 mm), microphenocrysts (0.05 – 0.50 mm), and microlites (< 0.05 mm), which are part of the groundmass.

Some representative rocks samples were collected for geochemical analysis (39 samples from lava flows and 3 samples from scoria cones; see Fig. 1). Major and trace elements data were determined by x-ray fluorescence (XRF) spectrometry using a Panalytical Axios 4000 spectrometer and a Siemens SRS-3000 spectrometer at Bologna University (Italy) and Universidad Católica del Norte (Chile), respectively. Besides, trace elements and rare earth (REE) elements were analyzed by XRF using an inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Deutsches Geo Forschungs Zentrum, Potsdam (Germany). Analyses made at Bologna University (Italy) following the methods of Franzini et al. (1972), Franzini (1975), Leoni (1976) and Franceschelli et al. (1986). Samples were analyzed at Bologna University laboratories for 10 major element oxides, the loss on ignition (LOI), and 21 trace elements. After overnight heating at 950°C (LOI 950), LOI was evaluated, representing a measure of volatile substances (wt. %), including pore water, inorganic carbon, and organic matter. The estimated precision and accuracy for trace-element determinations was 5%, except for elements with low concentrations (<10 ppm), for which the accuracy was lower (10%). For constructing the geochemical diagrams, only the samples taken from the lava flows analyzed were used.

The bulk volume calculation for Negros de Aras volcanic products has been made by two-volume calculations: i) the total bulk volume calculation of the entire volcanic field (lava flows and scoria cones), and ii) the bulk volume calculation of the scoria cones. Therefore, the volume of the lava flows was obtained by the subtraction of these volumes. The volume calculation was evaluated by a TanDEM-X 12 m image (Krieger et al., 2007). The volcanic field's total bulk volume corresponds to the difference in volumes between the DEM of the current surface and the pre-eruptive surface, which was generated by constructing a mesh of points (e.g. Kereszturi et al., 2016). The volume of each scoria cone was calculated individually using the MORVOLC algorithm (Grosse et al., 2009; 2012; http://cediac.uncu.edu.ar/software/). The outlines of each scoria cone and the entire volcanic field were obtained manually using a slope map generated with the ArcGIS™ software.

RESULTS

Petrography

The samples of Negro de Aras lava flows display fine-grained with phaneritic (<1 mm), hyalopilitic, and pylotaxitic textures, with a strong flow orientation. The same samples show low porphyritic indexes (<5 – 10 % vol.) with inequigranular phenocrysts. The phenocrysts correspond to fragmented plagioclase (max. 0.7 mm; see Fig. 2a) with high corroded forms (see Fig. 2b), and elongated orthopyroxene (max. 0.7 mm) with partial reabsorption boundaries (see Fig. 2c), which also occur in a fragmented form (see Fig. 2d). Besides, clinopyroxene phenocrysts exhibit glomerophyric aggregate (1mm; see Fig. 2e), reaction boundary (max. 0.6 mm; see Fig. 2e), and zoning (see Fig. 2f), in order of abundance. Olivine phenocrysts are present in relict form, with skeletal texture (0.7 - 0.9 mm; see Fig. 2h),

strongly oxidized and reabsorbed (see Fig. 2i). Overall, phenocrysts are immersed in a dark groundmass (60 – 70 % vol.) composed of disoriented plagioclase and pyroxene microliths, and opaque minerals. The groundmass is glassy in a range of 10 – 40 % vol., where augite (see Fig. 2j) and magnetite are present as accessory minerals. Some samples display primary vesicles in a range (15 – 50 % vol.), which exhibit regular and rounded small size and irregular of slightly larger size (1 - 4 mm). Some cavities with secondary fillings were observed; the fillings were optically recognized as Fe oxides and hydroxides (see Fig. 2k).

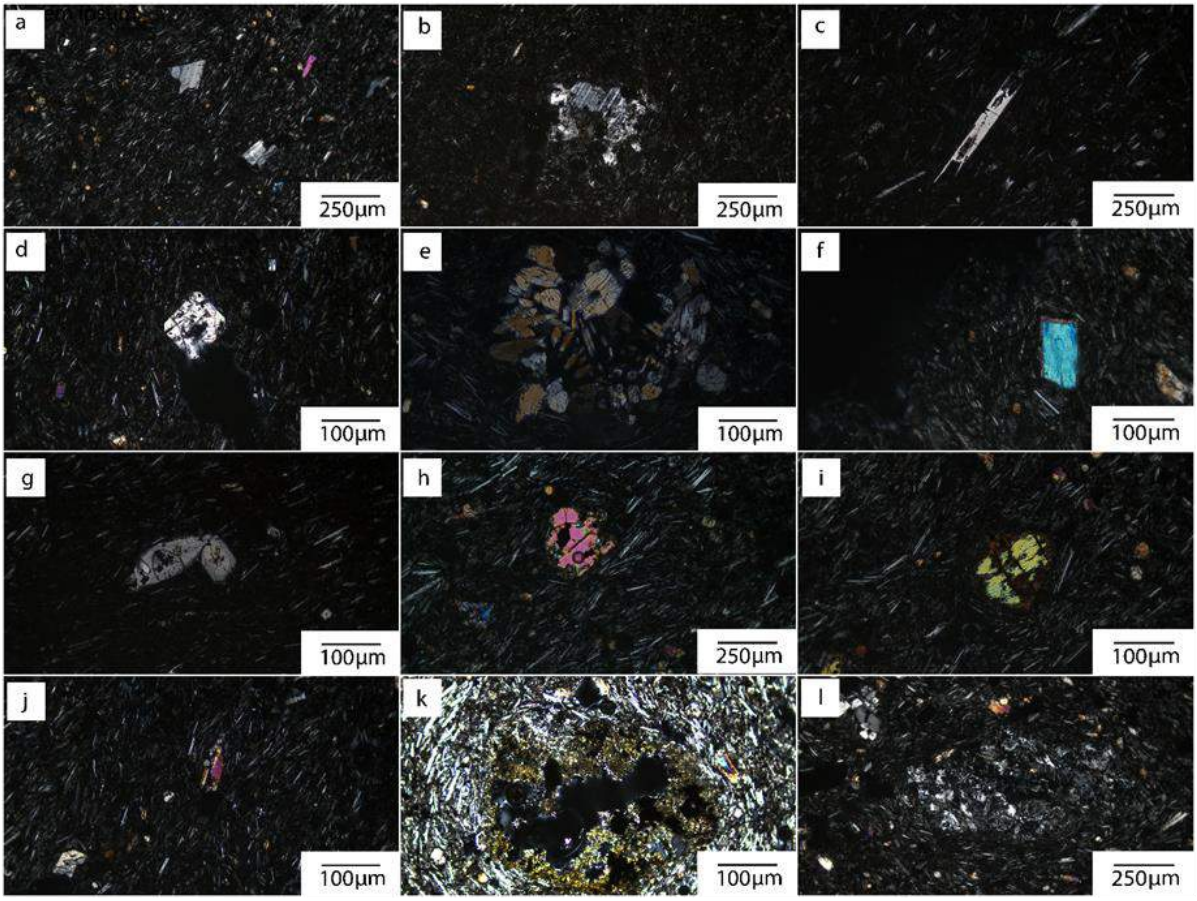


Figure 2. Representative microphotographs (in cross-polarized light) of the Negros de Aras volcanic field. a) Phenocrysts of fragmented plagioclase. b) Strongly corroded plagioclase with the polysynthetic twinning presence of yellowish granules recognized as epidote. c) Resorbed orthopyroxene with disoriented plagioclase and opaque minerals. d) Ortopyroxene cryst. e) Clinopyroxene and orthopyroxene glomeroporphyric aggregate immersed in the vitreous groundmass. f) Phenocrysts of clinopyroxene cross-polarized light. g) Zoned clinopyroxene phenocrysts. h) Relict olivine. i) Extremely oxidized relict olivine. j) Micro phenocrysts of augitic pyroxene. k) Cavity filled with secondary products, recognized like iron hydroxide. l) Xenolith.

Geochemistry

From geochemical point of view, the analyzed samples of Negros de Aras volcanic field (3 from scoria cones, and 39 from lava flows, see Fig. 1b) display a range from basaltic andesite to trachy-andesite compositions (53 - 57 wt.% of SiO_2; see Fig. 3a). The concentration of MgO and FeO of lava flows range from 0.43 to 4.75 wt.%, and from 9.04 to 1.46 wt.%, respectively. In contrast to this, scoria cones range from 1.89 to 1.31 wt.% and from 5.36 to 8.55 wt.%, respectively. On the other hand, Tucúcaro Ignimbrite samples display a rhyolitic composition (>76 wt.% of SiO_2; see Fig. 3a). The lava flows and scoria cones show a well-defined Calc-Alkaline to High-K Calc Alcaline trend (see Fig. 3b). Samples normalized to the N-MORB (see Fig. 3c; Sun and McDonough, 1989) display relative enrichment of LILE

(Large-Ion Lithophile Elements) and LREE (Light Rare Earth Elements) and depletion of HREE (Heavy Rare Earth Elements) values. Rb and K show positive anomalies while Nb, Ti, and Pb show negative anomalies; no Eu anomaly is presented.

The concentrations of the major oxides MgO, TiO_2, Fe_2O_3, and CaO decrease with the increase of SiO_2 content. K_2O increases with increasing content of SiO_2, while Al_2O_3, Na_2O, and P_2O has not a clear trend of increasing/decreasing related to SiO_2 content. The concentration of Ca, Fe, Cr, and Ni decrease with the increase of SiO_2 content. The concentration of Ba, Rb, and Sr/Y increase with SiO_2 content. Samples show high Sr/Y content compared to Y concentration; however, two samples show low Sr/Y content and high Y content (see Fig. 4a), which are located in NW area of Negros de Aras. The relationship between Ba vs. Rb shows how relatively low Rb content corresponds to high Ba content (see Fig. 4b). Fig. 4c displays a directly proportional trend between the increase in the concentration of Sr/Y and Sm/Yb. The trends of Tb/Yb vs. La/Yb (see Fig. 4d) and Dy/Yb and Sm/Yb (see Fig. 4f) show a relationship directly proportional to the increase in the content of the two ratios. In contrast, Fig. 4e shows a vertical relation corresponding to the relatively high content in Ba/Zr in contrast to the low content in Th/Zr.

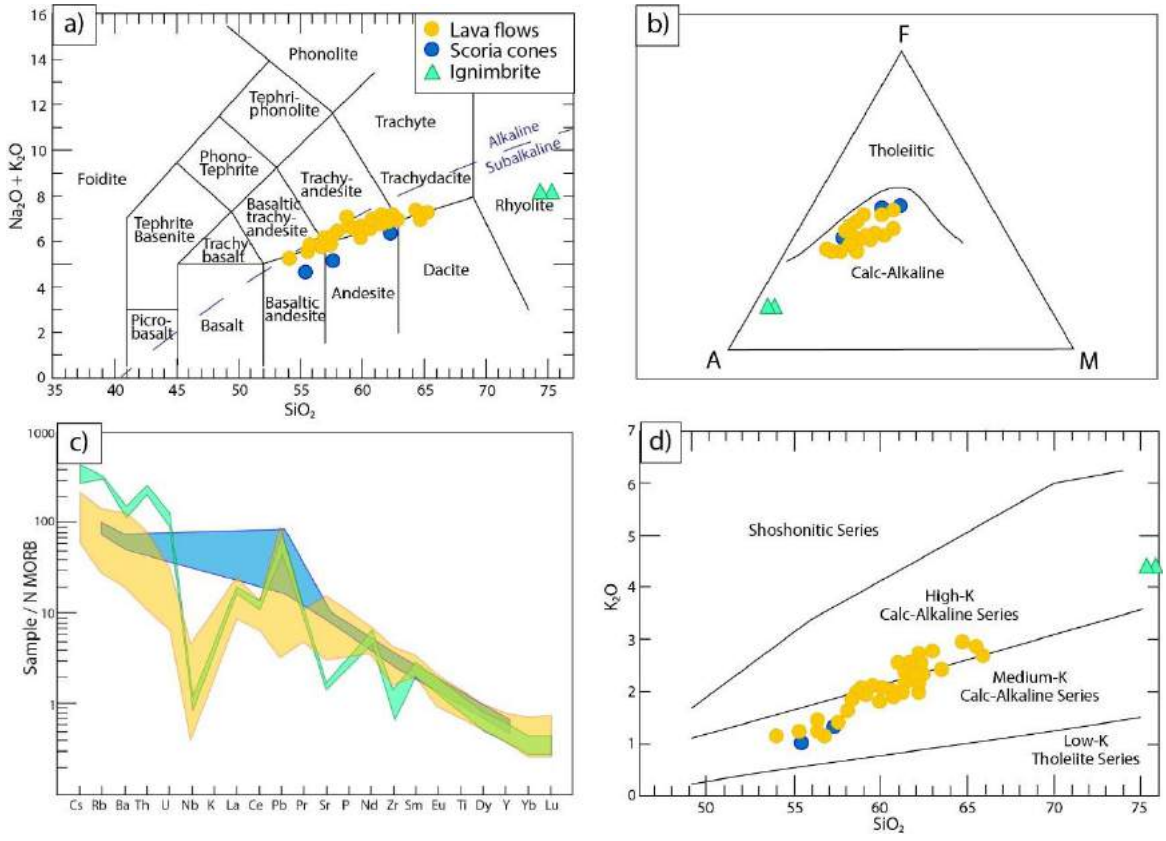


Figure 3. a) TAS classification diagram (Le Bas et al., 1986). b) AFM diagram (Irvine and Baragar, 1971). c) N-MORB normalized multi-element plots showing incompatible trace elements (Sun and McDonough, 1989). d) Alkali vs. Silica diagram (Peccerillo and Taylor, 1976).

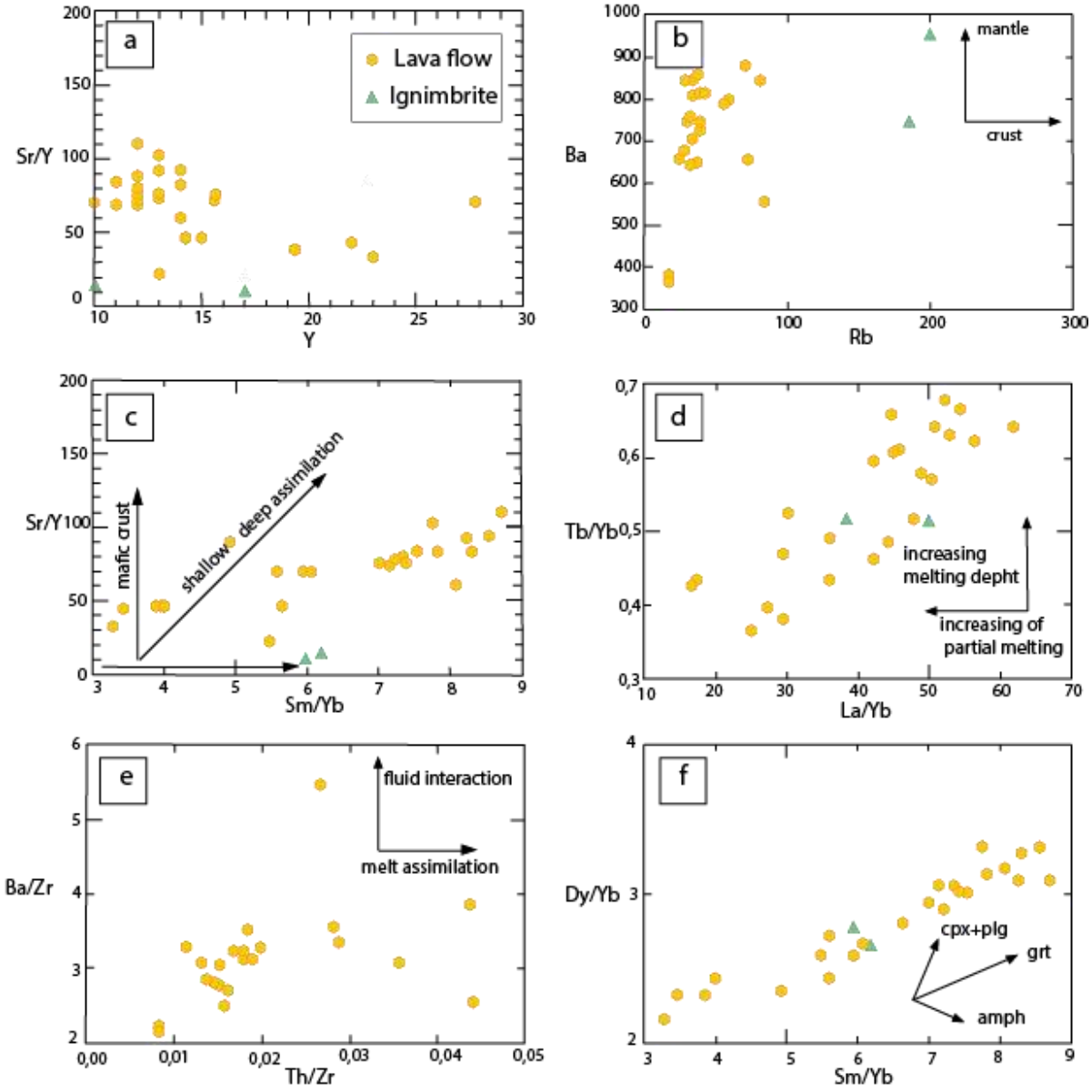


Figure 4. Diagrams showing a) Sr/Y vs. Y. b) Ba vs. Rb. c) Sr/Y vs. Sm/Yb. d) Tb/Yb vs. La/Yb. e) Ba/Zr vs. Th/Zr. f) Dy/Yb vs. Sm/Yb of the studied samples.

Volume estimation

The total bulk volume of the volcanic field corresponds to 7.93 km^3, which is distributed in an area of 182.25 km^2 (see Fig. 5). The bulk volume of the scoria cones was calculated using only 17 scoria cones, which display the minimum required size to volume analysis with MORVOLC to avoid false volume (Aguilera et al., 2020). Lava flows exhibit an average thickness of 44 m with a total bulk volume of 7.82 km^3. On the other hand, the scoria cones analyzed display an average height of 61 m and a total bulk volume of 0.11 km^3.

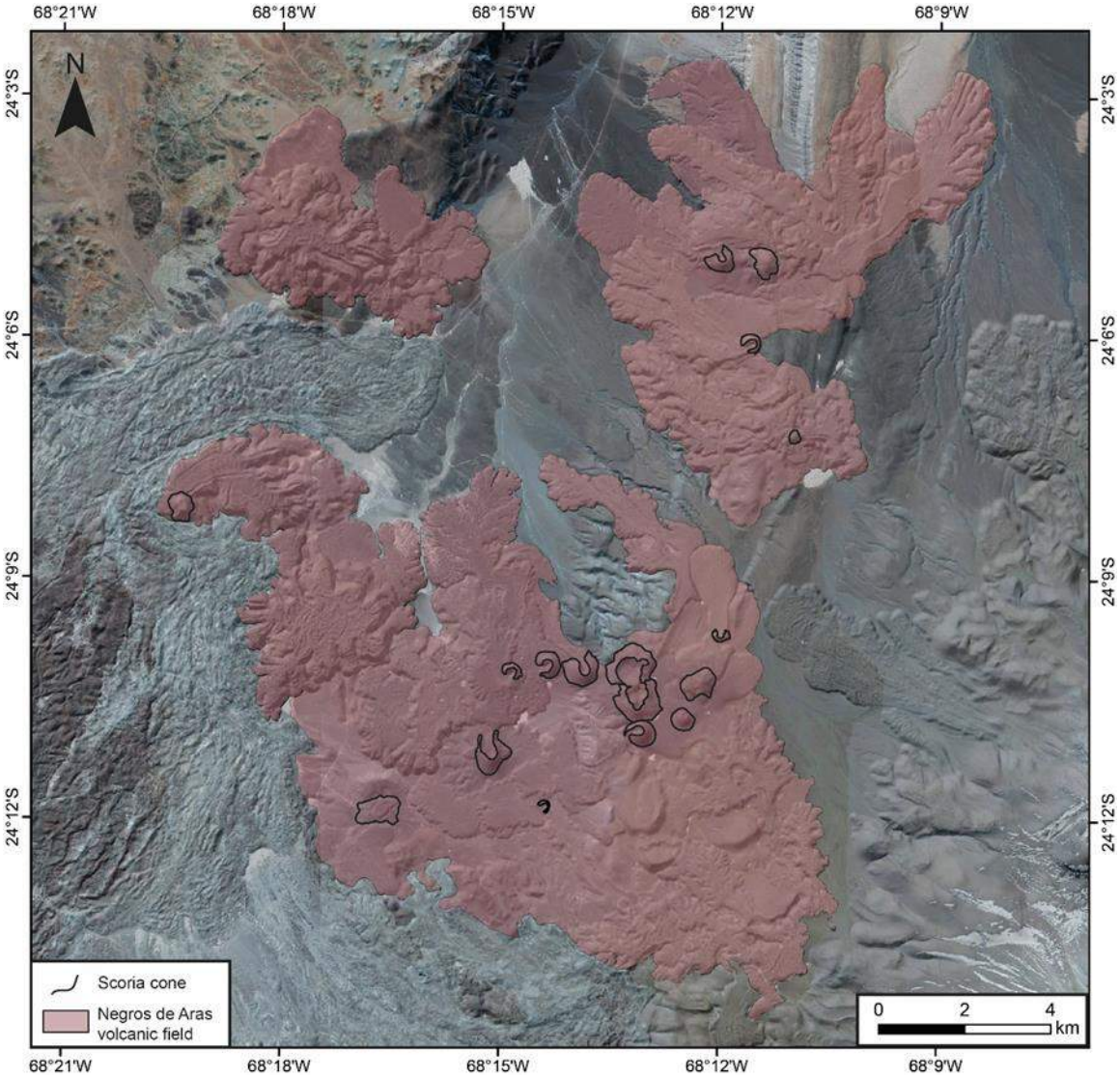


Figure 5. High-resolution satellite image of the monogenetic volcanic field Negros de Aras, showing the area in which the volume of the volcanic field and scoria cones was calculated. The satellite image was taken from Google Earth.

DISCUSSION

Deep source origin: Textural and geochemical evidence

From what emerged from the analyzes carried out on the samples it is suggest, in accordance with the fine-grained (< 1 mm), phaneritic and hyalopilitic texture, and textural evidence and the presence of two different families of plagioclases, one of them in equilibrium with the groundmass-oriented, and the other one is in disequilibrium with the groundmass, two different magmatic processes. Plagioclase and pyroxene phenocrysts show disequilibrium textures (sieve and skeletal textures), zonation, reaction rims, and resorption edges. Olivine phenocrysts show skeletal texture with evident resorption edges and clinopyroxene alteration rims. These disequilibrium textures may be associated with rapidly ascended and/or rapid cooling of the magma (e.g. Maro and Caffe, 2017; Maro et al., 2017). This textural evidence has also been observed in many other monogenetic centers of the Altiplano-Puna area, associated with the same ascent model such as Cerro Bitiche (Maro and Caffe, 2017), Cerro

Overo maar (van Alderwerelt, 2017), La Poruña scoria cone (Godoy et al., 2019), Cerro Tujle maar (Ureta et al., 2020), or El País lava flow field (Torres et al., 2020). The mineral assemblage, without the presence of more evolved faces (e.g. amphibole, biotite, and quartz), suggests low differentiation of the magma, only recognized in magmas from deep sources where the minimal presence of spinel as microliths may be an indicator of a deep origin of the magmatic melt (Maro et al., 2017).

Geochemically, Negros de Aras rocks display a typical signature of subduction-related rocks: $SiO_2 \geq 56$ wt.%, $Al_2O_3 \geq 15$ wt.%, MgO between 0.43 – 4.75 wt.%, elevated Sr/Y and La/Yb ratios, high Sr values (Sr > 600 ppm), depleted Y (< 25 ppm) and HREE, absence of an Eu anomaly, Nb and Ti negative anomalies, and relative enrichment of LILE and LREE. Considering the general linear trends of normalized trace elements (e.g. HREE depletion), it is possible to suggest that Negros de Aras products were derived from deep source as mantle/lower crust interaction zone (Kay and Kay, 2002). Strongly supported by the high Ba content of the samples compared with the relatively low Rb content (see Fig. 4b), and the high contents of Tb/Yb compared with high Yb/La content (see Fig.4d), support the deep origin of the magma, only comparable with mantle characteristics (Mamani et al., 2010).

Based on textural, mineral assemblage, and geochemical evidence, it is possible to suggest Negros de Aras was formed by magmas that have ascended quickly from deep zones (probably associated with the mantle - lower crust interaction), triggered by adiabatic decompression, and followed by rapid cooling. Besides, based on the low percentage of crystals, fine-grained textures, skeletal textures, xenoliths, and content of LILE and LREE, a process of assimilation during turbulent magma ascent (ATA; Kerr et al., 1995) can be suggested. On the other hand, the thickness of the crust where Negros de Aras is emplaced (56 km; Yuan et al., 2002), the mafic and primitive geochemical characteristics of the products, and the presence of xenoliths (see Fig. 2l) support the idea of a selective and low degree of crustal interaction/contamination between the magma and the crust during a quick ascent of the magma to the surface (e.g. Mattioli et al., 2006; Maro et al., 2017; González-Maurel et al., 2019). However, isotopic analyzes are needed to understand better the magmatic processes associated with Negros de Aras magmas.

CONCLUSION

Negros de Aras is an expression of monogenetic volcanism in the Central Volcanic Zone (CVZ), which involves two different eruptive styles, well represented in this volcanic field (scoria cones and lava flows). The volumetric values obtained depict smaller bulk volume values for the scoria cones (0.007 km^3) than the bulk volumes obtained for the lava flows (7.82 km^3). Geochemically, Negros de Aras products display similarities with magmas from deep source origins. Specifically, from magmas derived from the mantle – lower crust interaction. The textural evidence presents in Negros de Aras (e.g. olivine with skeletal texture and xenolith presence) display interesting characteristics, which can be associated with the ATA process, where the magma rises under turbulent conditions. Besides, the geochemical and textural evidence in this volcanic field displays an opportunity to confirm further how the ATA process is visible in this type of volcanism's final products. We have already specified that there is a lack of isotopic data capable of confirming this supposition; however, the many observable similarities from the petrographic and geochemical data of Negros de Aras with other cases of studies provide strong evidence to associate the same magmatic ascent model (e.g. Cerro Bitache; Maro and Caffe, 2017; La Poruña; González-Maurel et al., 2019; El Pais lava flow field; Torres et al., 2020; Cerro Tujle; Ureta et al.,

2020). Therefore, in accordance with the data obtained, this work proposes that Negros de Aras was the surface expression of the fast and turbulent conditions of the rising magma, being controlled by the internal parameters to develop different morphotypes in surface (scoria cones and lava flows).

REFERENCES

Aguilera, M., Ureta, G., Aguilera, F., Németh, K. and Vilches, M., The first morphological analysis of scoria cones in the Negros de Aras monogenetic volcanic field, northern of Chile. 8th International Maar Conference. (2020).

Anderson, M., Low, R. and Foot, S., Sustainable groundwater development in arid, high Andean basins. Geological Society, London, Special Publications, 193(1): 133-144. (2002).

Aron, F., González, G., Veloso, E. and Cembrano, J., Architecture and style of compressive Neogene deformation in the eastern-southeastern border of the Salar de Atacama Basin (22 30'-24 15'S): A structural setting for the active volcanic arc of the Central Andes, 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), pp. 52-55. (2008).

Bolós, X., Martí, J., Becerril, L., Planagumà, L., Grosse, P. and Barde-Cabusson, S., Volcano-structural analysis of La Garrotxa Volcanic Field (NE Iberia): Implications for the plumbing system. Tectonophysics, 642: 58-70. (2015).

Cañón-Tapia, E., Reappraisal of the significance of volcanic fields. Journal of Volcanology Geothermal Research, 310: 26-38. (2016).

Cecioni, A. and Frutos, J., Primera noticia sobre el hallazgo de Paleozoico inferior marino en la Sierra de Almeida, norte de Chile, Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, pp. 191-207. (1975).

de Silva, S., Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. Geology, 17(12): 1102-1106. (1989).

de Silva, S.L. and Kay, S.M., Turning up the heat: high-flux magmatism in the Central Andes. Elements, 14(4): 245-250. (2018).

Franceschelli, M., Leoni, L., Memmi, I. and Puxeddu, M., Regional distribution of Al-silicates and metamorphic zonation in the low-grade Verrucano metasediments from the northern Apennines, Italy. Journal of Metamorphic Geology, 4(3): 309-321. (1986).

Franzini, M., Revisione di una metodologia analitica per fluorescenza-X, basata sulla correzione completa degli effetti di matrice. (1975).

Franzini, M., Leoni, L. and Saitta, M., A simple method to evaluate the matrix effects in X-ray fluorescence analysis. X-ray Spectrometry, 1(4): 151-154. (1972).

Godoy, B., Taussi, M., González-Maurel, O., Renzulli, A., Hernández-Prat, L., le Roux, P., Morata, D. and Menzies, A., Linking the mafic volcanism with the magmatic stages during the last 1 Ma in the main volcanic arc of the Altiplano-Puna Volcanic Complex (Central Andes). Journal of South American Earth Sciences, 95: 102295. (2019).

González-Maurel, O., Godoy, B., Le Roux, P., Rodríguez, I., Marín, C., Menzies, A., Bertin, D., Morata, D. and Vargas, M., Magmatic differentiation at La Poruña scoria cone, Central Andes, northern Chile: Evidence for assimilation during turbulent ascent processes, and genetic links with mafic eruptions at adjacent San Pedro volcano. Lithos, 338: 128-140. (2019).

González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E. and Shyu, J.B., Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23°S-24°S). Tectonics, 28. (2009).

González, P., Textura de los cuerpos ígneos, pp. 171-197. (2008).

Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P., Kervyn, M. and Petrinovic, I., Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. Geomorphology, 136: 114–131. (2012).

Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A. and Alvarado, G.E., Morphometry and evolution of arc volcanoes. Geology, 37(7): 651-654. (2009).

Gudmundsson, A., Rock fractures in geological processes. Cambridge University Press. (2011).

Hartley, A., Flint, S., Turner, P. and Jolley, E., Tectonic controls on the development of a semi-arid alluvial basin as reflected in the stratigraphy of the Purilactis Group (upper cretaceous-eocene), northern Chile. Journal of South American Earth Sciences, 5(3-4): 275-296. (1992).

Hoffman, C., Petrografía y geoquimica de los conos del campo de lavas negros de aras (23°57' - 24°26' lat. s. y 67°57' - 68°42' long. o.) al norte del volcán Socompa, II Región de Antofagasta, Chile. Undergraduate thesis, Universidad de Concepción, Chile. (2011).

Irvine, T. and Baragar, W., A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian journal of earth sciences, 8(5): 523-548. (1971).

Isaacson, P.E., Fisher, L.L. and Davidson, J., Devonian and Carboniferous Stratigraphy of Sierra de Almeida northern Chile, prellminary results. Andean Geology(25-26). (2010).

James, D., Controles estructurales en la distribución del volcanismo neógeno en el segmento Tilocalar-Socompa andes centrales, Chile. Undergraduate thesis, Universidad Catolica del Norte, Chile. (2019).

Kay, R.W. and Kay, S.M., Andean adakites: three ways to make them. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 303-311. (2002).

Kereszturi, G., Nemeth, K., Moufti, M.R., Cappello, A., Murcia, H., Ganci, G., Negro, C., Procter, J. and Zahran, H., Emplacement conditions of the 1256 AD Al-Madinah lava flow field in Harrat Rahat, Kingdom of Saudi Arabia – Insights from surface morphology and lava flow simulations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 309: 14–30. (2016).

Kerr, A.C., Kempton, P.D. and Thompson, R.N., Crustal assimilation during turbulent magma ascent (ATA); new isotopic evidence from the Mull Tertiary lava succession, NW Scotland. Contributions to Mineralogy Petrology, 119(2-3): 142-154. (1995).

Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M. and Zink, M., TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. Transactions on Geoscience Remote Sensing, 45(11): 3317-3341. (2007).

Kuhn, D., Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama basin, Chilean Andes. Tectonics, 21(4): 8-1-8-17. (2002).

Le Bas, M., Maitre, L., Streckeisen, A. and Zanettin, B., A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica system. Journal of Petrology, 27: 247-257. (1986).

Leoni, L., X-ray Fluorescence analysis of 29 trace elements in rock and mineral standards. (1976).

Maccaferri, F., Bonafede, M. and Rivalta, E., A numerical model of dyke propagation in layered elastic media. Geophysical Journal International, 180(3): 1107-1123. (2010).

Maccaferri, F., Bonafede, M. and Rivalta, E., A quantitative study of the mechanisms governing dike propagation, dike arrest and sill formation. Journal of Volcanology Geothermal Research, 208(1-2): 39-50. (2011).

Mamani, M., Wörner, G. and Sempere, T., Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 S to 18 S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Bulletin of Volcanology, 122(1-2): 162-182. (2010).

Maro, G. and Caffe, P., Neogene monogenetic volcanism from the Northern Puna region: products and eruptive styles. Geological Society, London, Special Publications, 446(1): 337-359. (2017).

Maro, G., Caffe, P.J. and Báez, W., Volcanismo monogenético máfico cenozoico de la Puna, Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán. Asociación Geológica Argentina. (2017).

Martí, J., López, C., Bartolini, S., Becerril, L. and Geyer, A., Stress controls of monogenetic volcanism: A review. (2017).

Martí, J., Planagumà, L., Geyer, A., Canal, E. and Pedrazzi, D., Complex interaction between Strombolian and phreatomagmatic eruptions in the Quaternary monogenetic volcanism of the Catalan Volcanic Zone (NE of Spain). Journal of Volcanology Geothermal Research, 201(1-4): 178-193. (2011).

Mattioli, M., Renzulli, A., Menna, M. and Holm, P.M., Rapid ascent and contamination of magmas through the thick crust of the CVZ (Andes, Ollagüe region): Evidence from a nearly aphyric high-K andesite with skeletal olivines. Journal of Volcanology Geothermal Research, 158(1-2): 87-105. (2006).

Menand, T., The mechanics and dynamics of sills in layered elastic rocks and their implications for the growth of laccoliths and other igneous complexes. Earth Planetary Science Letters, 267(1-2): 93-99. (2008).
Menand, T., Physical controls and depth of emplacement of igneous bodies: A review. Tectonophysics, 500(1-4): 11-19. (2011).
Németh, K., Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism. The Geological Society of America, Special Paper 470: 43. (2010).
Peccerillo, A. and Taylor, S., Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to mineralogy petrology, 58(1): 63-81. (1976).
Ramírez, C. and Gardeweg, M., Hoja Toconao, Región de Antofagasta: Carta Geológica de Chile, 1: 250,000 Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. 54. (1982).
Ramírez, C., Gardeweg, M., Davidson, J. and Pino, H., Mapa geológico del área de los volcanes Socompa y Pular, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Documentos de trabajo, 4(1). (1991).
Ramirez, C.F., The geology of Socompa volcano and its debris avalanche deposit, northern Chile, Open University. (1988).
Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C. and Christenson, B., The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. Chemical Geology, 396: 164-181. (2015).
Smith, I. and Németh, K., Source to surface model of monogenetic volcanism: a critical review. Geological Society, London, Special Publications, 446(1): 1-28. (2017).
Sun, S.-S. and McDonough, W.F., Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345. (1989).
Torres, I., Németh, K., Ureta, G. and Aguilera, F., Characterization, origin, and evolution of one of the most eroded mafic monogenetic fields within the central Andes: The case of El País lava flow field, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences: 102942. (2020).
Ureta, G., Aguilera, F., Németh, K., Inostroza, M., González, C., Zimmer, M. and Menzies, A., Transition from small-volume ephemeral lava emission to explosive hydrovolcanism: The case of Cerro Tujle maar, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences: 102885. (2020).
Urzúa, F., Estratigrafía y sedimentologia de la Formacion Zorritas en la Sierra Guanaqueros, extremo sur de la Sierra de Almeida, Alta Cordillera de la Region de Antofagasta-Chile. Unpubl. Memoria, Universidad del Norte, Antofagasta, 185. (1989).
Valentine, G. and Gregg, T., Continental basaltic volcanoes—processes and problems. Journal of Volcanology Geothermal Research, 177(4): 857-873. (2008).
van Alderwerelt, B.M.E.d.R., Diverse monogenetic volcanism across the main arc of the central Andes, northern Chile. (2017).
Ward, K.M., Delph, J.R., Zandt, G., Beck, S.L. and Ducea, M.N., Magmatic evolution of a Cordilleran flare-up and its role in the creation of silicic crust. Scientific reports, 7(1): 1-8. (2017).
Wörner, G., Mamani, M. and Blum-Oeste, M., Magmatism in the central Andes. Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, Petrology, 14(4): 237-244. (2018).
Yuan, X., Sobolev, S.V. and Kind, R., Moho topography in the central Andes and its geodynamic implications. Earth Planetary Science Letters, 199(3-4): 389-402. (2002).
Zandt, G., Leidig, M., Chmielowski, J., Baumont, D. and Yuan, X., Seismic detection and characterization of the Altiplano-Puna magma body, central Andes. Pure Applied Geophysics, 160(3-4): 789-807. (2003).

TOMOGRAFÍA SÍSMICA LOCAL EN 3D DE ESTRUCTURAS PRE-CENOZOICAS EN EL MARGEN COSTERO DE CHILE CENTRAL: SISTEMA DE FALLAS DE PICHILEMU

Calle-Gardella D.[a], Comte D.[a,b], Farías M.[c], Roecker S.[d] y Rietbrock A.[e]

[a]*Advanced Mining Technology Center, FCFM, Universidad de Chile, CHILE*
[b]*Departamento de Geofísica, FCFM, Universidad de Chile, CHILE*
[c]*Departamento de Geología, FCFM, Universidad de Chile, CHILE*
[d]*Earth and Environmental Sciences, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA*
[e]*Geophysical Institute, Department of Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, GERMANY*

email: daniela.calle@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio muestra una caracterización detallada del sistema de la falla de Pichilemu a través de una Tomografía Sísmica Local combinando la base de datos de sismos locales registrados por dos redes de estaciones sismológicas desplegadas el 2010 (Farías et al., 2011) y el 2017 alrededor de Pichilemu, entre los 34°S a 35°S, y 71°W a 72°W. El conjunto de datos combinados estuvo compuesto por los tiempos de llegada de ondas P y S de 3691 eventos, y se utilizaron para generar un modelo 3D de velocidades de ondas P y S, y la relación Vp/Vs desde la superficie hasta 50 km de profundidad. 122 mecanismos focales para terremotos con M ≥ 1 fueron generados. La relocalización de hipocentros con el modelo 3D de velocidades obtenido muestra que gran parte de la sismicidad registrada está asociada al sistema de fallas de Pichilemu. La estructura principal del sistema de fallas estaría orientada a N145°E con una extensión de alrededor de 50 km de longitud. Eventos con mecanismos normales predominan para los eventos con M≥2 y son similares a los mecanismos de los terremotos del 11 de marzo de 2010 en Pichilemu. Las anomalías de baja velocidad se correlacionan con las zonas de fractura asociadas a la traza principal del sistema fallas de Pichilemu, y un alto contraste en Vp/Vs coincide con las estructuras conocidas de la era paleozoica a mesozoica. Se observa un alto Vp/Vs en la proyección de la falla con el contacto interplaca, lo que sugiere que posiblemente esta zona de la corteza esté debilitada por la presencia de fluidos provenientes de la placa subductada. Se sugiere que la ubicación del sistema de fallas de Pichilemu estaría regida por contrastes reológicos heredados de la evolución del complejo de subducción representado por la actual Cordillera de la Costa.

Palabras Clave: Tomografía Sísmica, LET, Falla de Pichilemu, Margen Chileno

INTRODUCCIÓN

La identificación y caracterización de fallas es fundamental para la evaluación del riesgo sísmico, y para la ciudad de Pichilemu, en Chile central, es de particular importancia el estudio del Sistema de Fallas de Pichilemu (SFP), cuya existencia era completamente desconocida antes de marzo de 2010. Su estudio comienza posterior al terremoto del Maule, terremoto de subducción Mw 8.8 ocurrido el 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile, con la instalación de una red sísmica temporal (ver Figura 1, triángulos negros) desplegada por Farías et al. (2011) para investigar la

respuesta de las estructuras costeras a este gran terremoto. Doce días después del terremoto de Maule, se produjo una secuencia de terremotos corticales en el margen central de Chile con mecanismos de falla normales (ej: Farías et al., 2011, Ruiz et al., 2014). Esta actividad se prolongó durante varios meses, teniendo sus eventos más importantes (Mw=6.9 y Mw=7.0) el 11 de marzo de 2010 (ver Figura 1, círculos rojos), asociándose esta secuencia de terremotos corticales al SFP (Farías et al., 2011, Ryder et al. 2012).

Para caracterizar mejor este sistema de fallas, en el presente estudio se desplegó una segunda red temporal alrededor de Pichilemu en el año 2017. Y utilizando los conjuntos de datos combinados del 2010 y 2017, buscamos obtener una caracterización actualizada y más detallada del SFP, con modelos 3D Vp, Vs y Vp/Vs determinados utilizando la Tomografía Sísmica Local (LET).

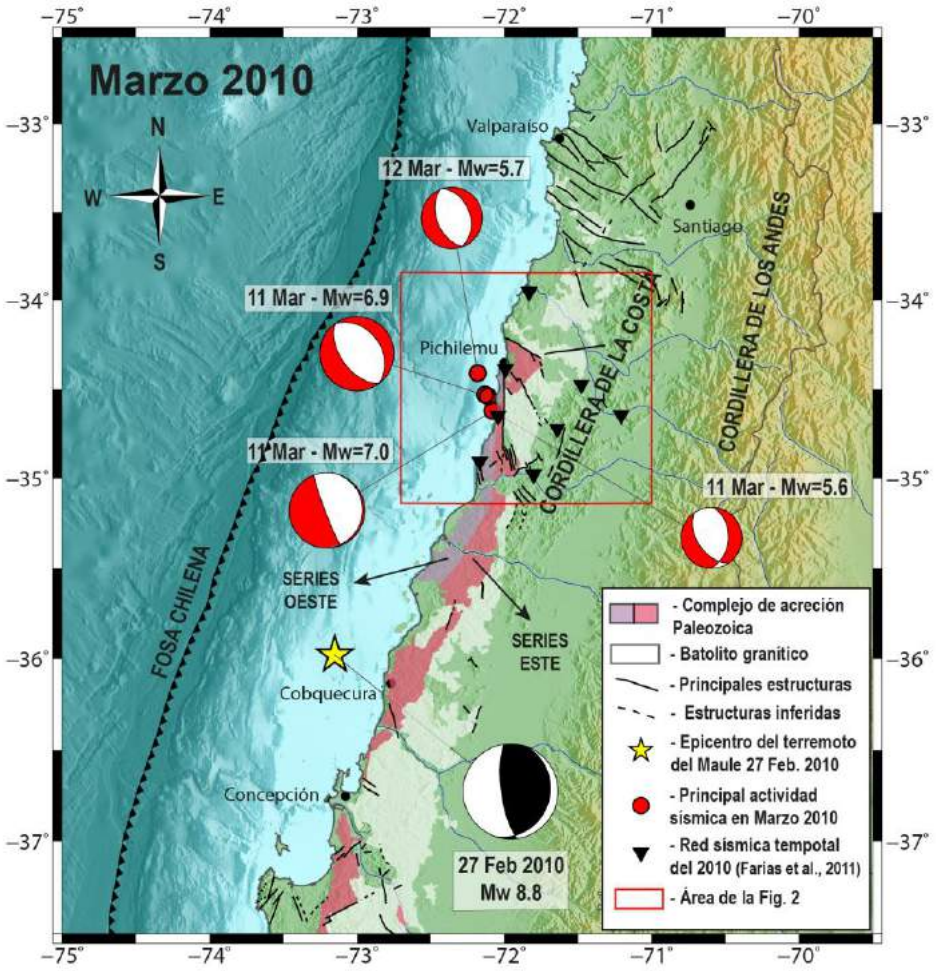


Figura 1: Mapa de la zona costera centro-sur de Chile. La estrella amarilla corresponde al epicentro del terremoto Mw8.8 del 27 de febrero de 2010 en Maule. Los principales sismos corticales de fallas normales se muestran en rojo. Los triángulos negros invertidos localizan la red sísmica temporal del 2010 (Farías et al., 2011). Los mecanismos focales son del Global Centroid Moment Tensor Project (gCMT, http://www.globalcmt.org). La Geología es de Hervé et al (2013) donde las zonas morada, rosada y blanca están asociadas con la serie oeste, la serie est y el batolito granítico respectivamente. Las estructuras principales e inferidas son de SERNAGEOMIN (2002), y las fallas cerca de Valparaíso fueron completadas con Sabaj (2008). El rectángulo rojo representa el área de la Figura 2.

Geotectónica local: Pichilemu

Los afloramientos expuestos de la zona de estudio (entre 34°S-35°S y 71,3°W-72,1°W) muestran edades que van desde el Carbonífero hasta el Cuaternario (ver Figura 2). Las principales estructuras geológicas incluyen el complejo metamórfico de Pichilemu de la edad Paleozoica tardía, junto con intrusivos y depósitos marinos y continentales de la edad Neógena (ver Figura 2). El complejo metamórfico de Pichilemu es un prisma de acreción dividido en una serie oriental y otra occidental por la falla Pichilemu-Vichuquén (PVF) (ver Figura 2). La formación de este complejo metamórfico se ha atribuido a la acreción frontal (serie este) y a la acreción basal (serie oeste) en un sistema de subducción activo formado durante el ciclo tectónico de Gondwanico (Richter et al. 2007; Willner et al. 2008). La serie oriental se formó primero como una antigua cuña de la cuenca del antearco que se metamorfizó bajo un gradiente de baja presión y alta temperatura. Más tarde, la serie occidental se creó por una serie de sedimentos que formaron un prisma basal bajo un gradiente de alta presión y baja temperatura (Willner 2005; Willner et al., 2005; Richter et al., 2007; Hervé et al., 2013). La creación de este complejo metamórfico aparentemente comenzó antes de la creación del Batolito Costero (compuesto principalmente por intrusivos graníticos del Paleozoico) (ver Figura 2), que también está presente en la zona (Hervé et al, 2013; Charrier et al., 2014). Los principales rasgos neotectónicos presentes en la actual área de estudio están asociados a las estructuras del Cuaternario (Farías et al., 2011).

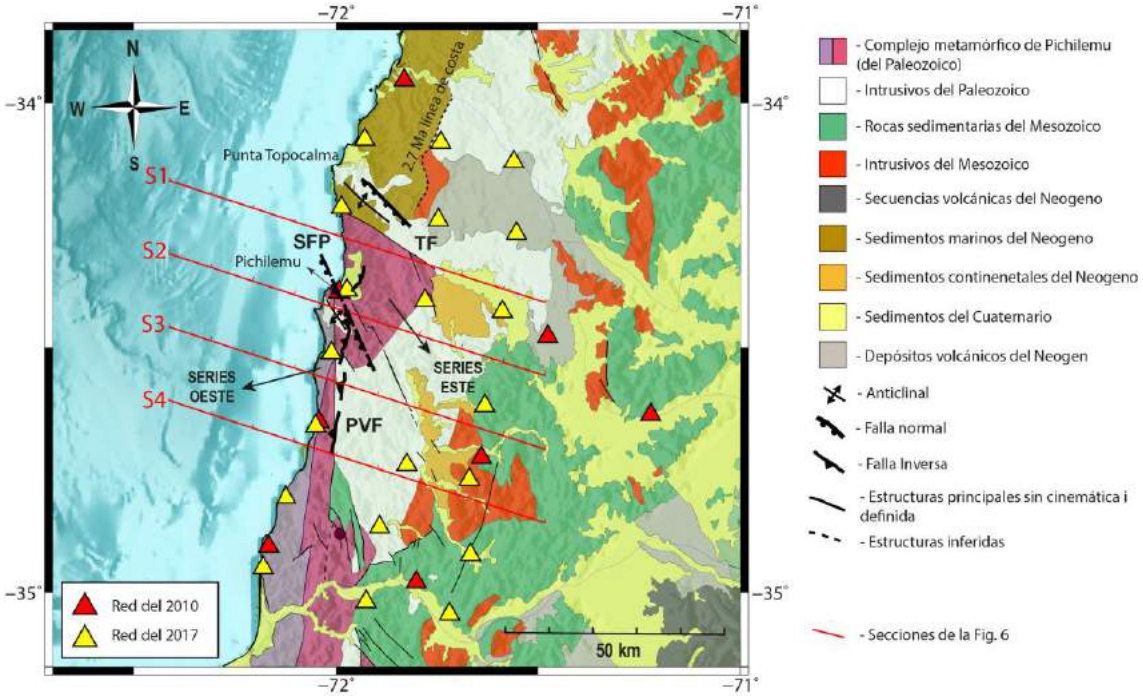


Figura 2: Mapa geológico de la región de Pichilemu (modificado a partir de SERNAGEOMIN 2003, Hervé et al. 2013, Farías et al. 2011) que muestra las principales estructuras geológicas de la zona, y la ubicación de las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio. Las principales estructuras son TF: Falla Topocalma, SFP: Sistema de Fallas de Pichulemu y PVF: Falla de Pichilemu-Vichuquén (Farías et al., 2011). Los triángulos amarillos y rojos localizan las redes temporales instaladas en 2010 y 2017, respectivamente. Las líneas rojas localizan las secciones utilizadas para la Figura 4.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Base de datos inicial de sismos locales

Los datos utilizados en este estudio son tiempos de llegada de las ondas P y S de sismos locales registrados por dos redes de estaciones sísmicas tri-componentes, periodo corto (4,5 Hz) y registro continuo, desplegadas en dos períodos diferentes alrededor de Pichilemu (ver Figura 2): La primera red, compuesta por 8 estaciones, se instaló inmediatamente después del terremoto principal del 27 de febrero de 2010 por Farías et al. (2011) y registró hasta junio de 2010. La segunda red de 20 estaciones operó entre enero y marzo de 2017.

Para identificar los tiempos de llegada de las ondas P y S de la red del 2017, y para datos no procesados de la red del 2010, utilizamos el algoritmo Regressive ESTimator (REST) descrito en Comte et al. (2019) con el modelo de velocidades 1D utilizado por Farías et al. (2011). Bajo los criterios de un mínimo de 4 fases con menos de 1,2 s de tiempo de viaje residual absoluto, un 5% de tiempo de viaje residual relativo y una desviación estándar máxima de 1,5 s para todos los residuales, se identificaron 1230 sismos en los datos del 2017 y 729 sismos de los datos no procesados del 2010. A esta base de datos de le agregaron los tiempos de llegada de las ondas P y S de 1.732 eventos registrados en el despliegue de 2010, los cuales se identificaron de forma manual, como se describe en Farías et al. (2011). La base de datos final utilizada en este estudio consistió en 3691 sismos con ~24500 tiempos de llegada de ondas P y ~20000 de ondas S.

Inversión 3D de los sismos locales

Los modelos 3D de Vp y Vp/Vs se obtuvieron utilizando la Tomografía Sísmica Local (LET), la cual utiliza la metodología de inversión conjunta descrita en Roecker et al. (2004; 2006) y aplicada por Comte et al. (2016; 2019), en la que, en un proceso iterativo, primero se realiza la reubicación hipocentral de la sismicidad, y luego se invierten las velocidades de onda P y S para obtener un nuevo modelo utilizando el LSQR.

El área de estudio se parametrizó especificando las velocidades de onda en una cuadrícula tridimensional de 60 (N-S) x 80 (E-W) x 35 (profundidad) nodos espaciados en intervalos de 2 km en longitud, latitud y profundidad. Inicialmente, la sismicidad se localizó utilizando el modelo de velocidad 1D para las ondas P y S determinado por Farías et al. (2011). Después de la primera localización, seleccionamos los sismos aplicando requisitos más estrictos que los utilizados para la generación inicial del catálogo: un mínimo de 6 fases con un máximo de 0,5 s de tiempo de viaje absoluto residual, una máxima desviación estándar de 0,5 s para todos los residuales, y una brecha azimutal menor de 270°. Nuestro modelo de velocidad final se obtuvo después de 27 iteraciones, en la cual se utilizó un conjunto de datos finales compuesto por 2.180 eventos con 14.113 P y 12.368 tiempos de llegada de la onda S. La desviación estándar residual se redujo de 0,097 s a 0,066 s, lo que representa una mejora del 32% con respecto a los obtenidos en el modelo 1D. Finalmente, utilizamos REST para estimar las polaridades de las ondas P, y con el algoritmo FOCMEC (Snoke, 2003) generamos 122 mecanismos doble cupla para terremotos con $M \geq 1$.

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Sismicidad local relocalizada

Los sismos relocalizados con nuestro modelo final (ver Figura 3) muestran sismicidad agrupada que la zona alrededor de Pichilemu (área sombreada en rojo) y su tendencia están entre el NW-SE y el NNW-SSE (azimut ≈ 145°). La sismicidad aumenta en profundidad hacia el suroeste. La orientación de esta sismicidad coincide con la propuesta de Farías et al. (2011) para la falla de Pichilemu y, por lo tanto, inferimos que esta sismicidad está asociada mayormente con la falla principal del SFP (ver Figura 3, línea azul discontinua), y estimamos que la falla principal tendría al menos 50 km de longitud. Un segundo grupo de sismicidad cortical (ver puntos blancos con profundidades <10km en Figura 3) ocurre al sur de Pichilemu a lo largo de la costa (ver Figura 3, al sur de 34.5°) y puede corresponder a una subfalla del SFP. Una tercera zona sismos de profundidad intermedia (profundidades de entre 40 y 50 km) se encuentra en la parte sudoriental de la zona de estudio y está relacionada con el contacto entre placas.

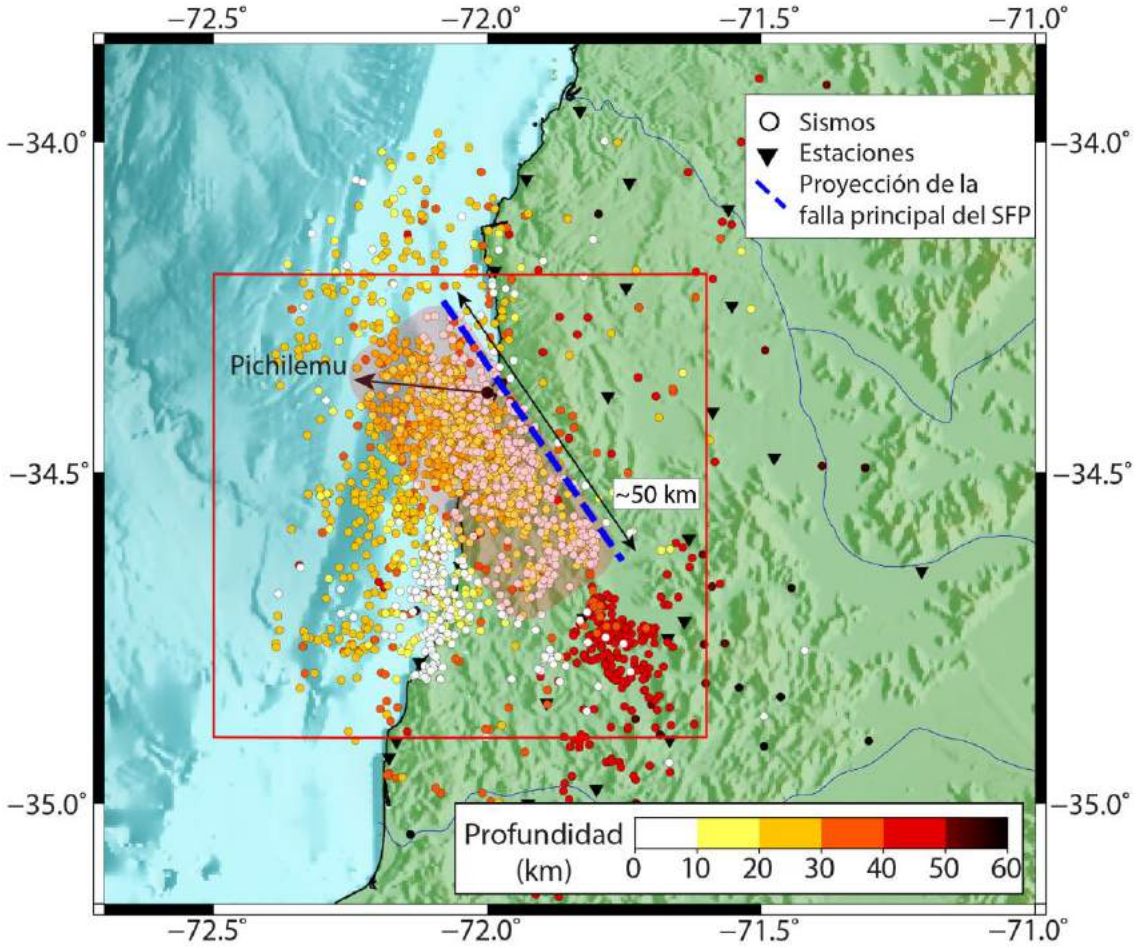


Figura 3: Los circulos representan la sismicidad registrada por las redes del 2010 y 2017 reubicadas con el modelo de velocidad 3D final. La línea punteada azul corresponde a la proyección en superficie de la traza principal del SFP asociado a la sismicidad. El área roja representa la proyección de la superficie del área cubierta por la sismicidad asociada al SFP. El rectángulo rojo representan el área de la Figura 5.

Modelos de Velocidades Vp, Vs y Vp/Vs

Para un mejor estudio de la zona, el modelo final de velocidades se representa en 4 secciones a lo largo del área de estudio (ver Figura 2).

El modelo de velocidad (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) muestra entre los primeros 10 km de profundidad para S1 una zona de baja Vp y baja Vp/Vs (entre 30-50 km en distancia, hacia el noreste de Pichilemu), y para S2 una pequeña zona de bajo Vp y altos Vp/Vs (entre 30-40 km en distancia, al sur de Pichilemu) donde se concentra parte de la sismicidad cortical, seguida de una región de Vp altas con Vp/Vs bajas. La separación de la anomalía en regiones de bajas y altas Vp/Vs se produce cerca del contacto mapeado entre la serie occidental y la serie oriental el complejo metamórfico de Pichilemu. El aumento de la densidad de las fracturas en las rocas puede causar una disminución de la velocidad de onda (ej: O'Connell & Budiansky (1974) y Toksöz et al. (1976)); por lo tanto, ambas anomalías con baja Vp pueden atribuirse a un volumen altamente fracturado. O'Connell & Budiansky (1974) y Toksöz et al. (1976) también sugieren que la disminución de Vp es mayor que la disminución de Vs en las rocas fracturadas, de modo que la relación Vp/Vs para rocas secas tiende a disminuir con el aumento de la densidad de las fracturas. Por lo tanto, estos resultados sugieren que la zona nororiental de Pichilemu representa una región altamente fracturada, pero seca. Al mismo tiempo, la región al sur de Pichilemu tiene una alta relación Vp/Vs que puede ser causada por una zona altamente fracturada e hidratada. Esta zona también tiene una alta tasa de sismicidad que, junto con la alta densidad de fracturas, es consistente con la presencia de un sistema de fallas.

A lo largo de todas las secciones (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, S1al S4) hay una zona poco profunda de alta Vp (en los primeros 10 km de profundidad) entre los 60 y 80 km de distancia. En el norte de Chile, Husen et al. (2000) asociaron altos valores de Vp en la corteza superior (menos de 15 km de profundidad) a los afloramientos de grandes cantidades de rocas basálticas que se formaron durante la actividad magmática del Jurásico y que comprenden el 70% del volumen de la actual cordillera de la costa. Como este estudio está situado cerca de la Cordillera de la Costa, las anomalías de alta Vp podrían estar relacionadas de manera similar con los depósitos volcánicos observados. En el mismo estudio, Husen et al. (2000) correlacionaron grandes regiones de alta Vp anómala debajo de la cordillera de la costa con un afloramiento de rocas en la superficie, asociado con material intrusivo. En esta zona de estudio, además del material magmático, se observan también intrusivos carboníferos, lo que podría explicar también la anomalía de velocidad.

En el S3 (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), entre unos 30 a 40 km de profundidad, hay una amplia zona de baja Vp y alta Vp/Vs, que sugiere hidratación de la interfase a lo largo del contacto interplaca, relacionado con una posible serpentinización de la cuña del manto (Christensen, 1996: Bostock et al., 2002) en esta zona.

ISBN 978-987-1323-66-1

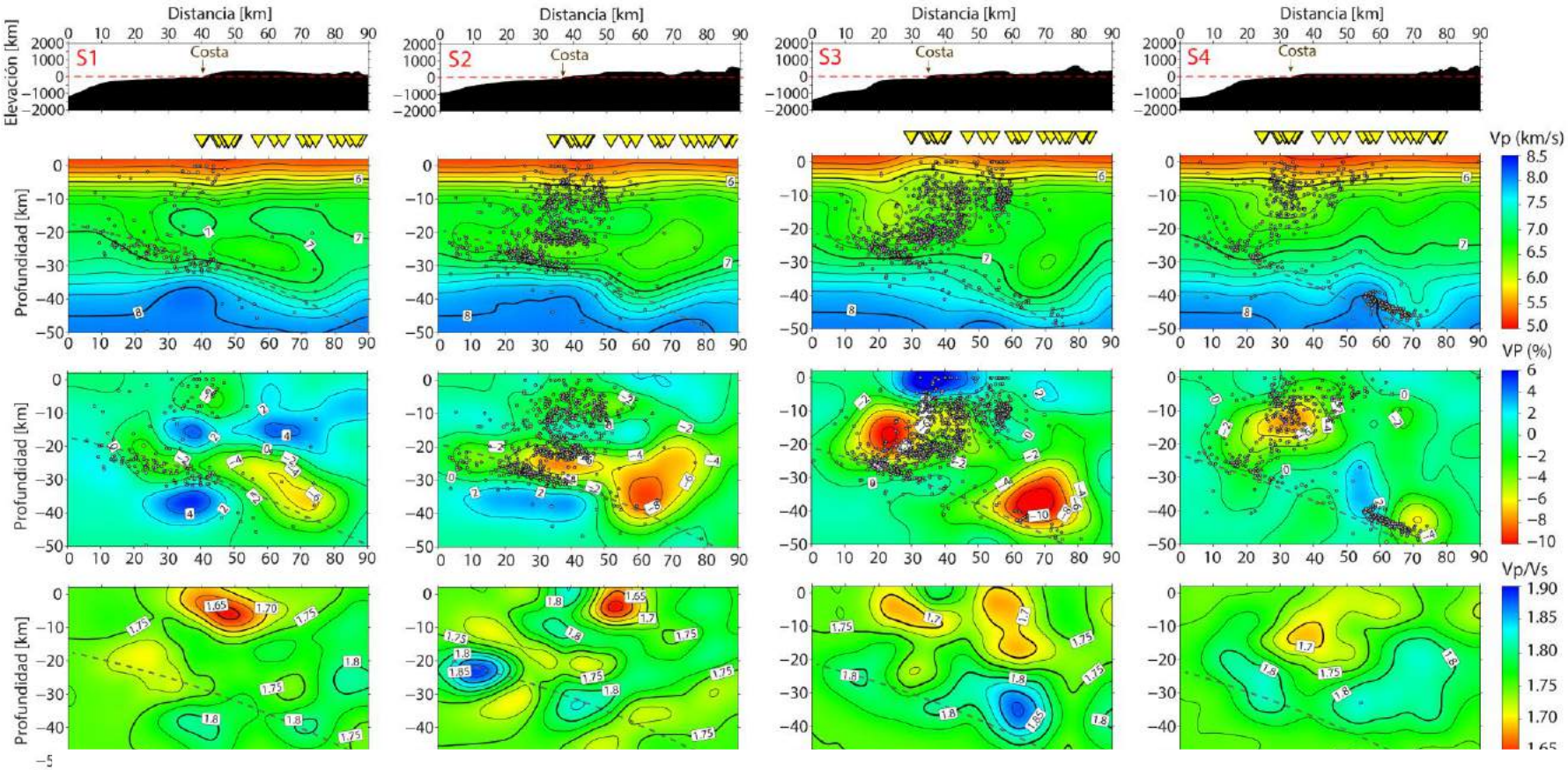


Figura 4: Modelos finales de velocidades 3D (Vp, Vp% y Vp/Vs) resumido en 4 secciones a lo largo del área de estudio (ver Figura 2). La primera fila muestra la topografía y la línea roja indica el nivel del mar. La segunda fila muestra el modelo para Vp (con intervalos de contorno de 0.2 km/s), la tercera fila para el cambio porcentual de Vp (con intervalos de contorno de 2%), y la última fila para Vp/Vs (con intervalos de contorno de 0.025). Los triángulos amarillos son las estaciones proyectadas en la sección. La línea de puntos gris representa la interfaz de la subducción (sam_slab1.0_clip.xyz en https://earthquake.usgs.gov/data/slab/models.php). Para cada sección, el ancho utilizado para las proyecciones es de ± 5 km para el modelo de velocidad, ± 10 km para la sismicidad, y ± 5 km para la subducción.

Las secciones transversales P1 y P2 (ver Figura 5 y Figura 6) muestran sismicidad agrupada en la placa superior que se extiende desde el contacto interplaca en P1 (a unos 30 km de profundidad) hasta la cerca de la superficie, y entre 5 y 25 km de profundidad para P2, con un manteo cercano a los 55°. También se observa una sismicidad cortical dispersa entre 5 y 15 km de profundidad en P2 fuera de la sismicidad agrupada, lo que evidencia un área altamente fracturada. Esta sismicidad se registró tanto en 2010 como en 2017. Los mecanismos focales normales predominan eventos con magnitudes mayores que M=2 y parecen estar relacionados con la falla principal del SFP.

Esta sismicidad está localizada, ya sea dentro o contigua a zonas de baja Vp, que son evidencia de fracturas intensas. En P1 (ver Figura *6*, columna izquierda), esta sismicidad está relacionada con la alta Vp/Vs que interpretamos como una zona hidratada que representa el principal rastro del SFP, como proponen Farías et al. (2011), y podría ser el resultado de la hidratación producida por la liberación de fluidos de las reacciones metamórficas a lo largo de la parte superior de la placa subductora. Por lo tanto, inferimos que el SFP está intensamente fracturado a lo largo de toda su extensión, y está hidratado donde se encuentra con el contacto de la placa interpuesta.

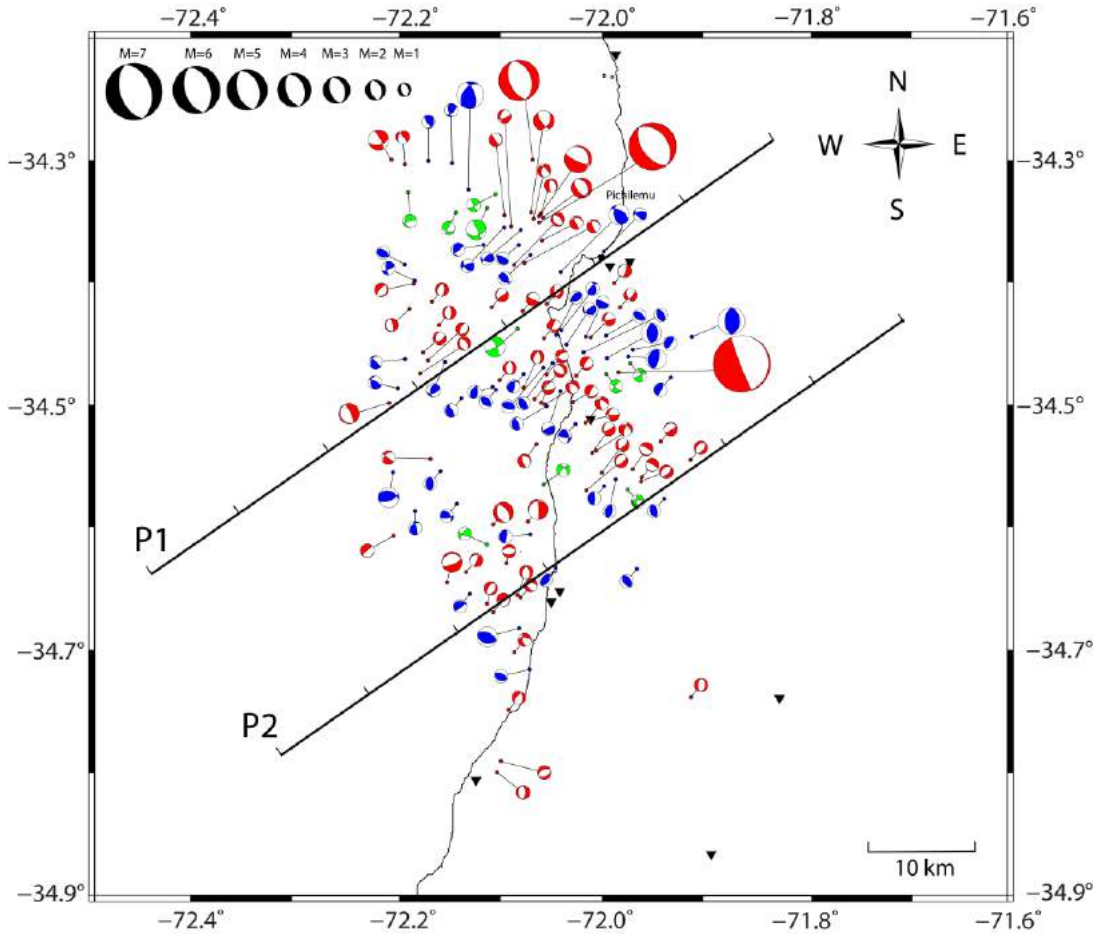


Figura 5: Mapa con los mecanismos focales corresponden a terremotos con M ≥ 1 y profundidad máxima de 30 km en la región de Pichilemu. Los círculos y mecanismos rojos, azules y verdes corresponden a fallas normales, inversas y de rumbo, respectivamente. El mecanismo negro muestra la escala de magnitud. Las líneas negras localizan los perfiles utilizados para la Figura 6.

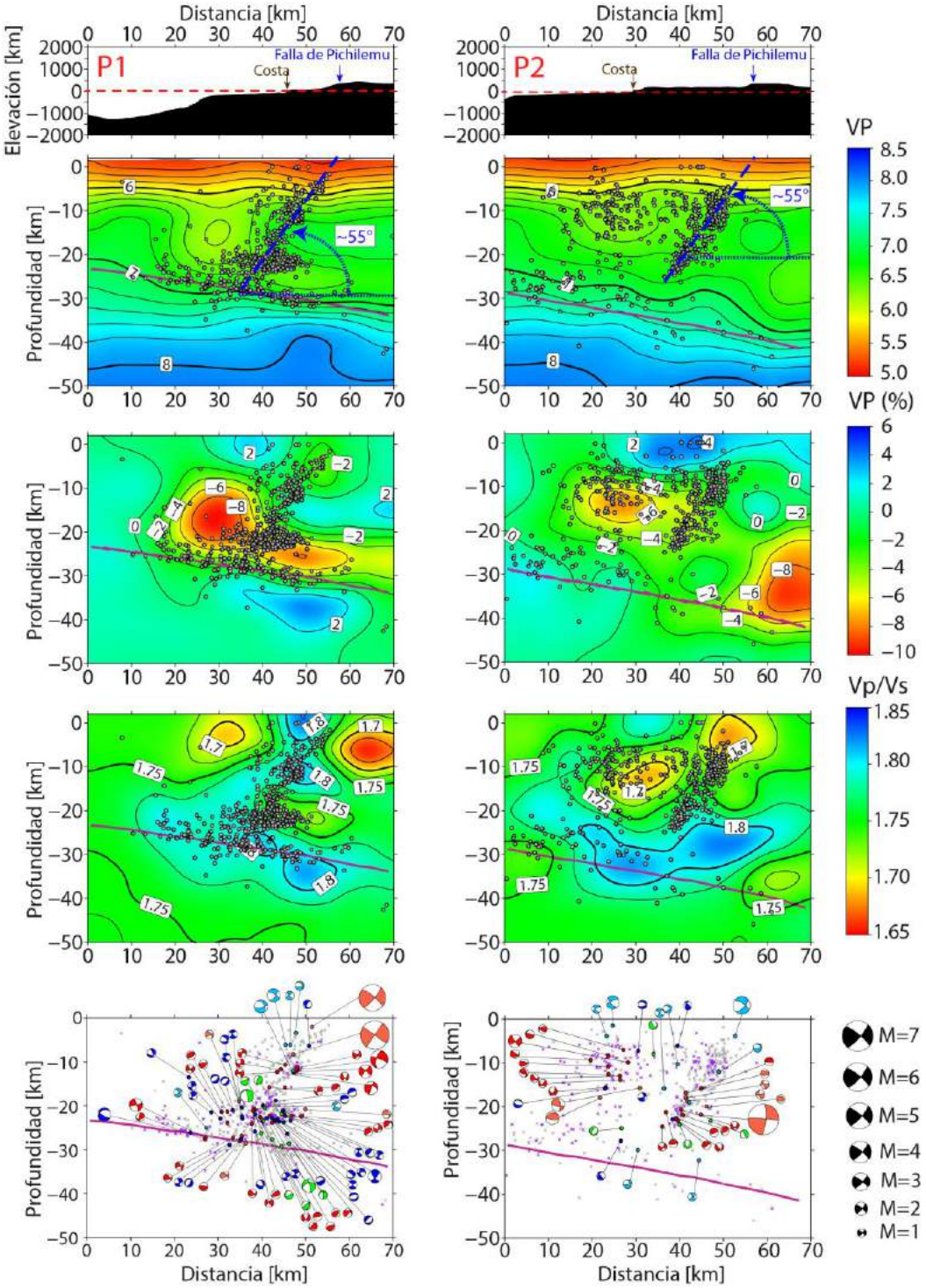


Figura 6: Topografía, Simicidad, mecanismos focales y modelos de velocidad Vp, Vp% y Vp/Vs a lo largo de los perfiles P1 y P2 mostrados en la Figura 5. La primera fila muestra la topografía proyectada en negro, el nivel del mar se indica con una línea roja, y la costa y la proyección de la falla principal de Pichilemu se indican con flechas marrones y azules, respectivamente. La segunda, tercera y cuarta fila muestra el modelo de velocidades de onda P (Vp), variación porcentual de Vp (Vp%), la relación Vp/Vs, respectivamente. La quinta fila muestra los sismos del 2010 y 2017 y sus mecanismos focales: el mecanismo rosa (2010) y rojo (2017) corresponden a fallas normales, el celeste (2010) y azul (2017) a fallas inversas, y el verde (2017) a fallas de rumbo. Las cruces pequeñas localizan aquellos eventos que se utilizaron en la tomografía pero para los que no se pudieron calcular los mecanismos focales (el gris y el púrpura corresponden a 2010 y 2017, respectivamente). Para cada sección, el ancho utilizado para las

proyecciones fue de: ± 1 km para el modelo de velocidad, ± 10 km para la sismicidad y ± 1 km para la subducción. La línea púrpura y la línea de puntos gris representan la interfaz de la losa (sam_slab1.0_clip.xyz en https://earthquake.usgs.gov/data/slab/models.php).

CONCLUSIONES

A partir del estudio de los hipocentros y de los modelos 3D de Vp y Vp/Vs determinados por LET, concluimos que la mayor parte de la sismicidad registrada por las dos redes sísmicas (2010 y 2017) cerca de Pichilemu está asociada al Sistema de Fallas de Pichilemu. Inferimos de la alta actividad sísmica en el área, de la gran variedad de mecanismos focales para eventos con M < 2, y la baja Vp asociada con esta sismicidad que el Sistema de Fallas de Pichilemu está intensamente fracturado. La falla principal de este sistema (ver línea azul discontinua en Figura 3), según su proyección en superficie, tendría una extensión de longitud aproximadamente de 50 km, y se extiende desde cerca de la superficie hasta unos 30 km en profundidad a lo largo de un plano inclinado orientado NNW-SSE y NW-SE (azimut ≈ 145°) y manteo cercano a los 55°, con orientación casi perpendicular a la placa de Nazca. Los altos valores de Vp/Vs asociados a la falla principal sugiere una hidratación del contacto interplaca, en buena concordancia con estudios previos.

En los alrededores de la falla, atribuimos la alta Vp contigua al sistema de fallas a la presencia de intrusivos carboníferos y actividad magmática jurásica que se asocian con la cordillera de la costa. Los altos valores de Vp/Vs por debajo del sistema de fallas en la parte superior de la cuña del manto son consistentes con una disminución de Vp, que probablemente sea el resultado de la hidratación producida por la liberación de fluidos de las reacciones metamórficas a lo largo de la parte superior de la placa subductada.

Por último, la determinación de un modelo tridimensional de velocidad de onda sísmica en una zona activa de la corteza no sólo permite comprender la respuesta de la corteza continental a los terremotos de subducción, sino que también ayuda a comprender mejor la evolución de un complejo de subducción, representado por la formación de la Cordillera de la Costa a lo largo del margen chileno. Dadas las características geológicas de la región de Pichilemu, concluimos que la deformación aquí está fuertemente controlada por las estructuras tectónicas. Esto es de particular importancia para la posible reactivación de las estructuras de la corteza durante y después de la ocurrencia de grandes terremotos de subducción y, por lo tanto, es también crítico para la evaluación del peligro sísmico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto FONDECYT 1161806 y el Centro de Tecnología Minera Avanzada (AMTC) proyecto CONICY AFB180004T. Las figuras fueron construidas con el paquete de procesamiento y visualización de datos Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel and Smith, 1991, 1995).

REFERENCIAS

Aaron, F., Allmendinger, R. W., Cembrano, J., González, G., & Yáñez, G. (2013). Permanent fore-arc extension and seismic segmentation: Insights from the 2010 Maule earthquake, Chile. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(2), 724-739.

Bostock, M. G., Hyndman, R. D., Rondenay, S., & Peacock, S. M. (2002). An inverted continental Moho and serpentinization of the forearc mantle. Nature, 417(6888), 536-538.

Charrier, R., Ramos, V. A., Tapia, F., & Sagripanti, L. (2014). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37 S (Chile and Western Argentina). Geological Society, London, Special Publications, 399(1), 13-61.

Christensen, N. I. (1996). Poisson's ratio and crustal seismology. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101(B2), 3139-3156.

Comte, D., Carrizo, D., Roecker, S., Ortega-Culaciati, F., & Peyrat, S. (2016). Three-dimensional elastic wave speeds in the northern Chile subduction zone: variations in hydration in the supraslab mantle. Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 207(2), 1080-1105.

Comte, D., Farías, M., Roecker, S., & Russo, R. (2019). The nature of the subduction wedge in an erosive margin: Insights from the analysis of aftershocks of the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake beneath the Chilean Coastal Range. Earth and Planetary Science Letters, 520, 50-62.

Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., & Pardo, M. (2011). Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. Tectonics, 30(6).

Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C. M., Pankhurst, R. J., & Godoy, E. (2013). Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. Gondwana Research, 23(3), 1122-1135.

Husen, S., Kissling, E., & Flueh, E. R. (2000). Local earthquake tomography of shallow subduction in north Chile: A combined onshore and offshore study. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B12), 28183-28198

Richter, P. P., Ring, U., Willner, A. P., & Leiss, B. (2007). Structural contacts in subduction complexes and their tectonic significance: The Late Palaeozoic coastal accretionary wedge of central Chile. Journal of the Geological Society, 164(1), 203-214.

Roecker, S., Thurber, C., & McPhee, D. (2004). Joint inversion of gravity and arrival time data from Parkfield: New constraints on structure and hypocenter locations near the SAFOD drill site. Geophysical Research Letters, 31(12).

Roecker, S., Thurber, C., Roberts, K., & Powell, L. (2006). Refining the image of the San Andreas Fault near Parkfield, California using a finite difference travel time computation technique. Tectonophysics, 426(1-2), 189-205.

Ruiz, J. A., Hayes, G. P., Carrizo, D., Kanamori, H., Socquet, A., & Comte, D. (2014). Seismological analyses of the 2010 March 11, Pichilemu, Chile M w 7.0 and M w 6.9 coastal intraplate earthquakes. Geophysical Journal International, 197(1), 414-434.

Ryder, I., Rietbrock, A., Kelson, K., Bürgmann, R., Floyd, M., Socquet, A., Vigny, C., & Carrizo, D. (2012). Large extensional aftershocks in the continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile. Geophysical Journal International, 188(3), 879-890.

Sabaj Abumohor, R. A. (2008). Identificación y Caracterización de Estructuras Potencialmente Activas en la Cordillera de la Costa entre los 33° y 33° 45´ s.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital, No. 4, scale 1:1,000,000. Serv. Nac. de Geol. y Min., Santiago, Chile.

Snoke, J.A., (2003). FOCMEC: Focal Mechanism determinations. In: Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., Kisslinger, C. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, San Diego (Part B: pp.1629–1630 and accompanying CD).

Toksöz, M. N., Cheng, C. H., & Timur, A. (1976). Velocities of seismic waves in porous rocks. Geophysics, 41(4), 621-645.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, Eos Trans. AGU, 72, 441, 1991.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, New version of the Generic Mapping Tools released, Eos Trans. AGU, 76, 329, 1995.

Willner, A. P. (2005). PresSure–temperature evolution of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North–Central Chile (34–35 30′ S). Journal of Petrology, 46(9), 1805-1833.

Willner, A. P., Thomson, S. N., Kröner, A., Wartho, J. A., Wijbrans, J. R., & Herve, F. (2005). Time markers for the evolution and exhumation history of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North–Central Chile (34–35 30′ S). Journal of Petrology, 46(9), 1835-1858.

Willner, A. P., Gerdes, A., & Massonne, H. J. (2008). History of crustal growth and recycling at the Pacific convergent margin of South America at latitudes 29–36 S revealed by a U–Pb and Lu–Hf isotope study of detrital zircon from late Paleozoic accretionary systems. Chemical Geology, 253(3-4), 114-129

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS PRODUCTIVOS CON INTENSIFICACIÓN GANADERA BOVINA. TUCUMÁN, ARGENTINA.

Canelada Lozzia M. I., Rearte M., Castro L., Guillén S. C., Grancelli S.M. y Vidal P.J.

Departamento Ecología, Facultad Agronomía FAZ, Universidad Nacional de Tucumán, ARGENTINA

e-mail: mariainescanelada@gmail.com

RESUMEN

La producción bovina con intensificación ganadera conocida como feedlot es un sistema que ha tenido una tendencia en aumento en la última década, presentando importantes modificaciones en el medio y con riesgo de producir impactos ambientales negativos. En Tucumán actualmente se contabilizan unas 40.000 cabezas distribuidas en 23 establecimientos registrados. Dadas sus implicancias ambientales es necesario valorar la sostenibilidad de estos sistemas productivos lo que condujo a nuestro equipo a trabajar, desde el año 2017, en la generación de una herramienta para el relevamiento de datos. Como consecuencia de los impactos ambientales negativos, y a la exigencia previa a la ejecución del proyecto de una Evaluación de Impacto Ambiental, se consideró necesario profundizar en los estudios tendientes a incorporar el concepto de manejo sostenible en estos sistemas. El objetivo del presente trabajo fue actualizar y aplicar un Conjunto Mínimo de Indicadores para evaluar la sostenibilidad de sistemas productivos de ganado bovino con intensificación ganadera en la Provincia de Tucumán. Las propuestas de Naciones Unidas y OECD al igual que otros organismos internacionales fueron base para el presente trabajo al igual que métodos y herramientas específicas para valorar la sostenibilidad en otros sistemas productivos agrícolas y pecuarios. Se estudiaron cinco sistemas productivos de feedlot bovinos ubicados en diferentes departamentos de la provincia. Se aplicó una encuesta ad hoc con 28 Indicadores calculándose Índices de Sostenibilidad Parcial por Tema. Los resultados muestran que, para los cinco sistemas estudiados, excepto para el Tema Económico, los índices arrojaron valores por debajo del 50%, lo que representa que su sostenibilidad no alcanza un estatus medio. Para todos los casos estudiados, los Temas Ambientales presentaron menor sostenibilidad. Con la herramienta colaborativa empleada se pudieron detectar los aspectos más insostenibles. Su conocimiento podría contribuir a disminuir los impactos y a proponer medidas enfocadas a mitigarlos.

Palabras clave: Indicadores de Sostenibilidad; Feedlot; Impactos Ambientales, Índices de Sostenibilidad

INTRODUCCIÓN

La producción bovina con intensificación ganadera conocida como feedlot es un sistema que ha tenido una tendencia en aumento prácticamente sostenida en la última década. Es una actividad intensiva con importantes modificaciones en el medio y con riesgo de producir impactos ambientales negativos. Aproximadamente el 30% de la oferta de carne del país proviene de estos sistemas de producción, encontrándose un gran número de ellos en la región de la Gran Pampa Húmeda (Tamashiro 2018). La provincia de Tucumán ha acompañado a la tendencia nacional y actualmente se conoce

que existen más de 50 establecimientos productivos con intensificación ganadera con diferentes niveles de producción y grados de autorización. Actualmente Argentina cuenta con 299 establecimientos dedicados a feedlot, con y sin confinamiento, con un total de 1.963.410 cabezas. En la Provincia de Tucumán se registran unas 40.000 cabezas en sistema de producción bovina con intensificación ganadera, distribuidas en 23 establecimientos registrados en diferentes lugares del territorio concentrados principalmente en los departamentos de Trancas y Leales (Gramajo Antuz 2020).

La Agroecología es la base científica para alcanzar una producción sostenible, buscando que los sistemas sean respetuosos de los recursos y servicios ecosistémicos, de los ciclos de la naturaleza, de las culturas y los conocimientos, entre otros principios fundamentales. Es necesario que los ejes de la sostenibilidad se mantengan en niveles adecuados de modo que no sobresalgan algunos objetivos sobre otros. Valorar la sostenibilidad de agroecosistemas es una actividad compleja, de carácter comparativo, cuyo mayor desafío es lograr una comparación cuantitativa (Guillén, 2008). Esta cuantificación de los diferentes aspectos de la sostenibilidad se realiza en base a indicadores específicos que se deben seleccionar y desarrollar para cada actividad en particular. Naciones Unidas, CEPAL y OECD han desarrollado a nivel global indicadores para evaluar la sostenibilidad abarcando los cuatro pilares fundamentales. En relación a la Agricultura Sostenible se resalta el desarrollo y aplicación de dos Marcos: FESLM (Framework for Evaluation Sustainable Land Management) de FAO (1993) y MESMIS (Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad) de Masera y otros (1999). A nivel global FAO (2020) ha desarrollado un instrumento conocido como TAPE (Herramienta para la Evaluación del Desempeño de la Agroecología) que está destinado a proporcionar evidencias a los responsables políticos, gestores, conductores y productores sobre cómo la agroecología puede contribuir a lograr sistemas alimentarios y agrícolas sostenibles. La información que recopila TAPE puede usarse para informar varios indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sustentable ODS, entre los que se puede mencionar a 2.4.1 (agricultura sostenible), 1.4.2 (derechos sobre la tierra) u 8.6.1 (biodiversidad).

Se considera que toda la cadena de producción de alimentos es uno de los principales contribuyentes del cambio climático. Las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero son el óxido nitroso de los suelos, el metano de la fermentación entérica de animales y el dióxido de carbono del cambio de uso de la tierra (deforestación), destacándose también las emisiones de la gestión del estiércol (Röös *et all*. 2014). La producción bovina con intensificación ganadera genera miles de toneladas de estiércol con grandes concentraciones de nutrientes, sales, antibióticos y compuestos orgánicos, entre otras sustancias, que pueden afectar el ambiente. Tal es su magnitud que desde FAO se ha investigado la composición de las dietas con el objetivo de disminuir sustancialmente los impactos negativos ambientales principalmente, desarrollando un conjunto de indicadores para alcanzar y garantizar lo que se dio a conocer como Dietas Sostenibles para Animales (Sustainable Animal Diets StAnD) (van Holsteijn et al. 2016). En Cuba, Iraola Jerez y Dios Palomares (2016) diseñaron un método de análisis relacionado con la implicación medioambiental de los sistemas de engorde de vacunos en pastoreo y en confinamiento, mediante la construcción de indicadores ambientales, analizando las actividades de manejo potencialmente negativas al ambiente. Determinaron un indicador global para engorde en pastoreo y otro para sistemas en confinamiento. Para el caso particular del engorde de vacunos en feedlot emplearon ocho indicadores de Riesgo e Impacto Ambiental comprendiendo los

subtemas Suelo, aire, recursos hídricos y biodiversidad. Con los mismos pudieron detectar impactos y realizar planteamientos de medidas enfocadas a mitigarlos en cualquier área de producción. Un estudio de la Universidad de Buenos Aires, advirtió acerca de las cantidades elevadas de fósforo que impactan de forma negativa sobre napas, suelos y aguas superficiales. Determinaron que el impacto ambiental negativo del volumen generado de estiércol y de efluentes aumenta al coexistir con precipitaciones anuales elevadas y con napas freáticas cercanas a la superficie (Tamashiro 2018). Un área de relevancia es el Bienestar Animal sobre lo cual se trabaja en diferentes sistemas productivos pecuarios y que vienen a dar las bases de manejo en estos sistemas particulares (Pordomingo 2003).

En el año 2017 Canelada Lozzia y otros, desarrollaron una herramienta como primer instrumento práctico para realizar el monitoreo de la sostenibilidad de esta actividad. Se construyó un primer Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) con 18 Indicadores comprendidos en los cuatro pilares de la sostenibilidad. Se diseñó una encuesta *ad hoc* para obtener los datos de sostenibilidad donde cada Tema se desglosó en subtemas y áreas con cuatro opciones de valoración de sostenibilidad.

Como consecuencia de los impactos negativos que pueden ocasionar estos agroecosistemas, en la provincia de Tucumán, se exige previo a la ejecución del proyecto, Evaluación de Impacto Ambiental (Ley 6253 Normas y Conservación del Medio Ambiente, Gobierno de Tucumán 1991). Todo ello ha conducido anuestro equipo de trabajo a realizar estudios tendientes a incorporar el concepto de manejo sostenible en estos sistemas. El objetivo del presente trabajo fue actualizar y aplicar un CMI para evaluar la sostenibilidad de sistemas productivos de ganado bovino con intensificación ganadera en la Provincia de Tucumán.

MÉTODOS

El conjunto mínimo de indicadores se seleccionó abarcando los cuatro temas propuestos por Naciones Unidas (2007) y considerando fundamentalmente al Modelo PER (presión-estado-respuesta) de la OECD (1993) y Modelo MESMIS (Masera *et al.*, 1999). Así mismo se tomó referencia de trabajos en diferentes agroecosistemas y sistemas productivos agroindustriales y pecuarios donde se evaluaron diferentes aspectos de la sostenibilidad (Flores *et al*., 2015, Canelada *et al*., 2016, 2019). Los temas abordados (social, ambiental, institucional y económico) se subdividieron en subtemas y diferentes áreas de relevancia, los cuales fueron analizados mediante indicadores. Para la obtención de los datos concretos de cada indicador (IS) se actualizó en cuestionario *ad hoc* que fue aplicado a los conductores de los sistemas productivos seleccionados (Canelada Lozzia *et al.* 2017). Se valoró con escalas de 1 a 4, siendo 1 el de menor y 4 el de mayor sostenibilidad. Con los valores obtenidos se generaron gráficos de coordenadas polares y se calcularon índices de sostenibilidad parcial o por tema (ISPT), aplicando una fórmula desarrollada por Martínez Santa-María (2006) adaptada por Guillén (2008) para el cálculo de áreas. Los ISPT resultan del cociente entre áreas de los polígonos que se generaron con los valores máximos de sostenibilidad y los de cada IS. El valor 1 (uno) del índice representa la máxima sostenibilidad del sistema evaluado con los indicadores seleccionados.

Para el presente trabajo se seleccionaron cinco Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina localizados en diferentes departamentos de la Provincia de Tucumán y con distinta capacidad productiva. Ver Tabla I.

Tabla I. Caracterización de Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina seleccionados para la evaluación de la sostenibilidad.

	Productor A	Productor B	Productor C	Productor D	Productor E
Departamento	Leales	Trancas	Alberdi	Graneros	Trancas
Nº cabezas	3500	1500	4500	3000	1800

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se seleccionaron 28 indicadores específicos correspondientes a los temas Social, Ambiental, Institucional y Económico, habiéndose incluido 10 indicadores más que en el trabajo inicial (Canelada Lozzia *et al.* 2017). Estos IS y los valores obtenidos del cuestionario *ad hoc* aplicado se expresan en la Tabla II.

Tabla II. Conjunto mínimo de Indicadores para evaluar sostenibilidad de sistemas productivos bovinos con intensificación ganadera y valores resultantes del cuestionario aplicado.

TEMA	SUB TEMA	ÁREA	INDICADOR	P1	P2	P3	P4	P5
SOCIAL	EQUIDAD	GENERO	a) **EQ** Igual oportunidad de trabajo entre mujeres y hombres	1	2	2	2	2
	SALUD	ASISTENCIA MÉDICA	a) **AS** Acceso a sistemas de salud	2	2	3	2	2
		SEGURIDAD	a) **EP** Elementos de Protección	3	3	3	2	3
	EDUCACIÓN	NIVEL EDUCACIONAL	a) **NE** Nivel de Educación	1	2	3	2	3
	EMPLEO	GENERACIÓN DE EMPLEO	a) **EGE** Estacionalidad en el empleo	4	4	2	3	4
AMBIENTAL	RECURSO AIRE	CAMBIO CLIMÁTICO	a) **GEI_1** Emisión de gases de efecto invernadero principalmente Metano, CO2 y Óxido nitroso	1	2	2	2	2
			b) **GEI_2** Empleo de energías renovables	2	1	2	1	2
		CALIDAD DE AIRE	a) **RCA** Riesgo de modificar La Calidad del Aire.	3	3	4	4	4
	RECURSO AGUA	RESIDUOS LIQUIDOS	a) **TE** Tratamiento de Efluente	1	2	2	1	2
		EFICIENCIA EN EL USO DEL RECURSO	a) **VA** Control de volumen de agua	1	2	3	2	2
		AGUA SUBTERRÁNEA	a) **CNF_1** Riesgo de contaminación de napa freática.	1	1	1	1	1
			b) **CNF2** Riesgo de contaminación de napa freática	4	2	3	4	4
	RECURSO SUELO	RESIDUOS SÓLIDOS	a) **RS** Destino de residuos sólidos	1	3	1	4	3
		RESIDUOS PATOLÓGICOS	b) **RP** Destino de residuos patológicos	1	2	2	1	2

	BIOCIDAS	ECOTOXICIDAD	a)**TB** Toxicidad de biocidas	**3.5**	**4**	**3**	**2**	**4**
			a) **AB** almacenamiento de biocidas	**2**		**4**	**2**	**1**
	FLORA	BIODIVERSIDAD	a) **BD** Conservación de la flora autóctona	**4**	**3**	**4**	**3**	**4**
INSTITUCIONAL	CAPACIDAD INSTITUCIONAL	COMUNICACIÓN	a) **AI** Acceso a la Información	**4**	**4**	**3**	**4**	**4**
		CAPACITACIÓN Y FORMACIÓN	a) **HC** Horas de capacitación	**2**	**2**	**2**	**2**	**3**
			b) CaC Calidad de la Capacitación	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**
		COMPROMISO AMBIENTAL	a) **PA** Participación en Programas Ambientales	**1**	**1**	**3**	**1**	**2**
		RELACIÓN CON EL MEDIO	a) **CO** Contacto con Organizaciones	**1**	**3**	**3**	**1**	**2**
		BIENESTAR ANIMAL	a) **CBA** Conocimiento Bienestar Animal.	**2**	**3**	**3**	**3**	**2**
			b)**ABA** Acciones en Bienestar Animal.	**2**	**3**	**4**	**4**	**4**
			c) **SAA** Sanidad Animal, Atención Médica y Prácticas Zootécnicas	**2**	**3**	**1**	**3**	**3**
ECONÓMICO	ESTRUCTURA ECONÓMICA	DESEMPEÑO DE LA ECONOMÍA	a)**PE** Productividad (Ingresos/Egresos)	**3**	**3**	**2**	**3**	**3**
		ESTATUS FINANCIERO	a) **GSB** Gasto Sueldo Beneficio	**3**	**4**	**3**	**3**	**3**
		RIESGO ECONÓMICO	a) **IE** Dependencia de Insumos Externos	**4**	**2**	**2**	**3**	**4**

En las figuras siguientes y en la Tabla III se presentan los gráficos de coordenadas polares y los Índices de Sostenibilidad Parcial por Tema (ISPT) para cada agroecosistema. Ver Fig. 1, 2, 3 y 4

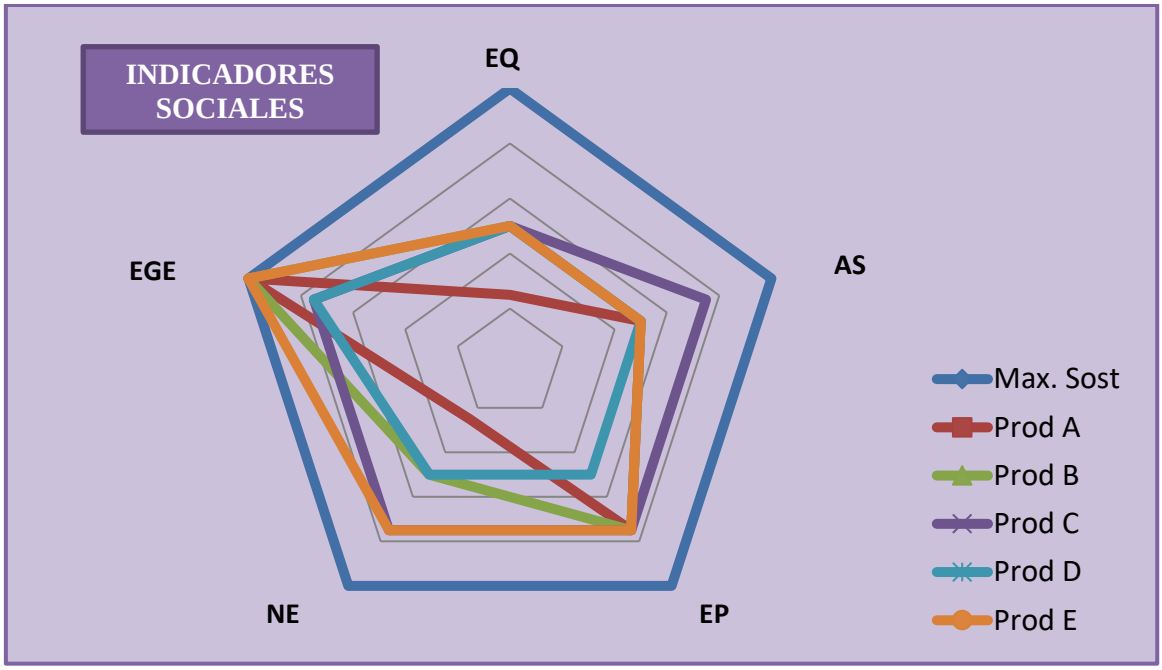


Figura 1. Representación de los Indicadores de Sostenibilidad Social de los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina A, B, C, D y E. EQ Igual oportunidad de trabajo entre hombres y mujeres, AS Acceso a sistemas de salud, EP Elementos de protección, NE Nivel de educación y EGE Estacionalidad en generación de empleo.

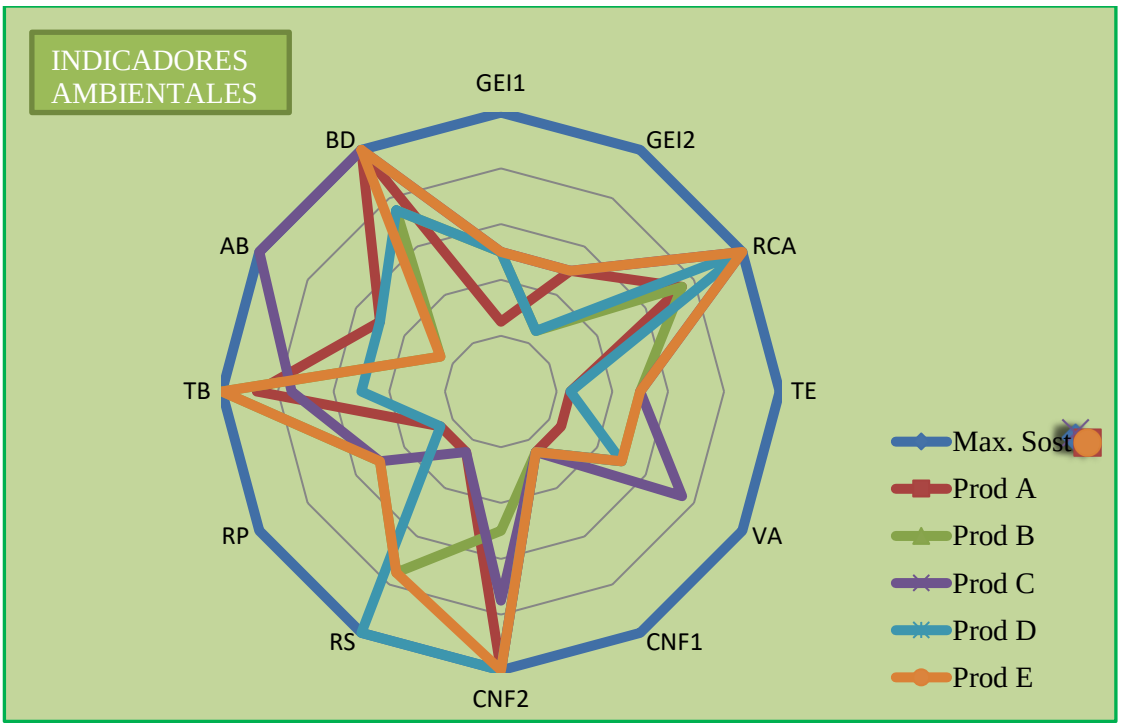


Figura 2. Representación de los Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina A, B, C, D y E. GEI1 Emisión de gases de efecto invernadero principalmente Metano, CO_2 y Óxido nitroso, GEI2 Empleo de energías renovables, RCA Riesgo de modificar la Calidad del Aire,TE Tratamiento de efluentes, VA Control de volumen de agua, CNF1 Riesgo de contaminación de napa freática, CNF2 Riesgo de contaminación de napa freática, RS Destino de residuos sólidos, RP Destino de residuos patológicos, TB Toxicidad de biocidas, AB almacenamiento de biocidas, BD Conservación de la flora autóctona.

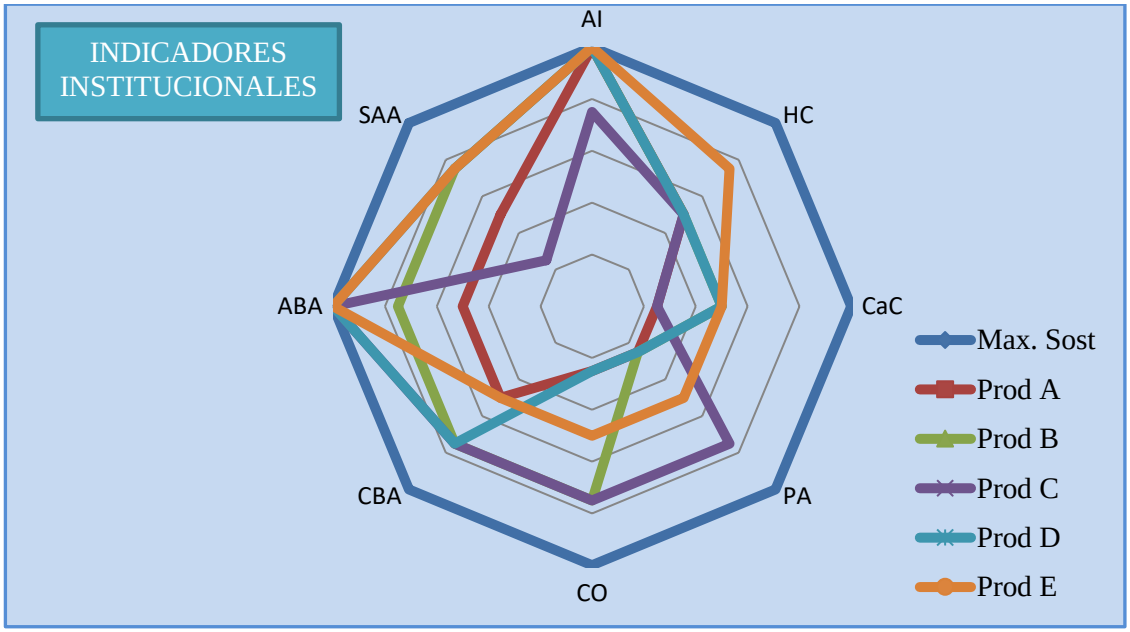


Figura 3. Representación de los Indicadores de Sostenibilidad Institucional de los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina A, B, C, D y E. AI Acceso a la Información, HC Horas de capacitación, CaC Calidad de la Capacitación, PA Participación en Programas Ambientales, CO Contacto con Organizaciones, CBA Conocimiento Bienestar Animal, ABA Acciones en Bienestar Animal, SAA Sanidad Animal, Atención Medica y Prácticas Zootécnicas.

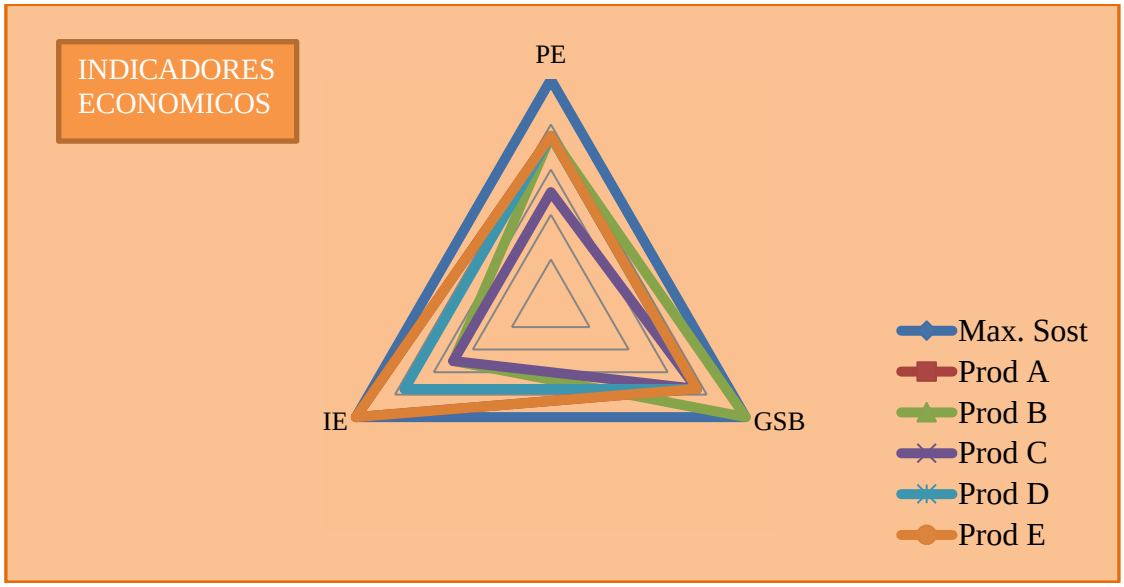


Figura 4. Representación de los Indicadores de Sostenibilidad Económica de los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina A, B, C, D y E. PE Productividad (Ingresos/Egresos), GSB Gasto Sueldo Beneficio, IE Dependencia de Insumos Externos.

Tabla III. Índices de Sostenibilidad Parcial para los temas Sociales, Ambientales, Institucionales y Económicos de los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina A, B, C, D y E.

ISPT	Productor A	Productor B	Productor C	Productor D	Productor E	Sostenibilidad Media/Tema
Social	0,28	0,41	0,49	0,25	0,38	0,39
Ambiental	0,20	0,30	0,33	0,29	0,42	0,30
Institucional	0,21	0,42	0,38	0,38	0,47	0,37
Económico	0,69	0,54	0,33	0,56	0,69	0,46
ISPT Total/Productor	0,34	0,42	0,38	0,37	0,49	

Los resultados del análisis de sostenibilidad de los sistemas productivos estudiados muestran, en el aspecto social, menores valores en referencia a la equidad y al nivel de educación. En el orden ambiental los IS que muestran insostenibilidad fueron los relacionados a Cambio Climático, a la falta de tratamiento de efluentes y al control del volumen de agua empleado. También dentro del orden ambiental y en relación a todo lo analizado, el IS que mide riesgo de contaminación de napa freática (monitoreo) es el de menor valor y en suelo lo más insostenible está dado por el manejo de los residuos patológicos. En el tema institucional los indicadores que reflejan mayor insostenibilidad fueron la calidad de las capacitaciones y la participación en programas ambientales. Estos resultados están en relación directa a los planteados y/o determinados por van Holsteijn y otros (2016), Iraola Jerez y Dios Palomares (2016) y por Röös y otros (2014).

Al analizar los ISPT para los cinco sistemas estudiados, se detectó que, excepto en el Tema Económico, todos los índices calculados dieron valores por debajo del 50%, lo que representa que su sostenibilidad no alcanza un estatus medio, recordando que en este estudio se considera al valor 1 (uno) como la máxima sostenibilidad. Los valores totales por Productor son similares siendo los del Productor E un poco mayores. Para todos los casos estudiados, los Temas Ambientales presentaron menor sostenibilidad en concordancia con los resultados obtenidos en estudios realizados en otros agroecosistemas (Canelada Lozzia *et al.* 2016, 2019, Flores *et al.* 2015).

La metodología propuesta por Naciones Unidas, donde se analiza la sostenibilidad mediante IS que abarcan cuatro temas, pudo ser adaptada para valorar el estado de sostenibilidad en Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina. Es resaltar que la herramienta generada en este trabajo abarca los 4 pilares a diferencia de la mayoría de los trabajos revisados que estudia principalmente los aspectos ambientales La generación de encuestas específicas que fueron ajustarlas con los conductores de los sistemas estudiados, se aproxima al modelo PER (presión-estado-respuesta) de la OECD (1993) y a los Modelos MESMIS (Masera *et al*., 1999) y de Guillén (2008); lo que confiere a esta herramienta de valoración de la sostenibilidad el carácter comparativo.

Diversos indicadores incluidos en este trabajo están alineados a los propuestos por FAO (2020) en la herramienta conocida como TAPE, la cual busca determinar el nivel de aproximación a la sostenibilidad agrícola de los sistemas productivos. En relación al trabajo inicial en la valoración de sostenibilidad en Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina (Canelada Lozzia *et al.* 2017), se incrementaron 10 IS con lo cual resultó en un CMI con 28 indicadores. En comparación a trabajos en otros agroecosistemas de Canelada Lozzia y otros (2016, 2019) donde también se trabajó con

los cuatro Temas de sostenibilidad prepuestos por UN, el presente CMI tiene un número manejable y representativo para valorar la sostenibilidad.

CONCLUSIONES

De los resultados se concluye que los Sistemas Productivos con Intensificación Ganadera Bovina estudiados con un CMI de 28 indicadores seleccionados en los Temas Sociales, Ambientales, Institucionales y Económicos no alcanzan un valor medio de sostenibilidad.
Con la herramienta colaborativa empleada se pudieron detectar los aspectos más insostenibles. Su conocimiento podría contribuir a disminuir los impactos y a proponer medidas enfocadas a mitigarlos.

Agradecimientos

Se agradece a SCAIT Secretaria de Ciencia UNT y a los Productores y Responsables de los sistemas productivos que participaron en el estudio.

REFERENCIAS

Canelada Lozzia M.I.; S.M. Grancelli; P.J. Vidal; M. Rearte; S. Monserrat; M.L Paéz Villalba; S.C. Guillén. Desarrollo y Aplicación de Indicadores de Sostenibilidad en Sistemas Productivos Hortícolas Bajo Cubierta. Tucumán, Argentina. Primer Congreso Argentino de Agroecología. 18, 19 y 20 de septiembre 2019. Mendoza. Argentina. pp. 958. (2019)

Canelada Lozzia, M.I., Rearte M, Guillén S.C., Vidal P.J., Juri S., Grancelli S.M. Generación de una herramienta colaborativa para evaluar la sostenibilidad en feedlot bovino. XXXIV Jornadas Científicas Asociación de Biología de Tucumán. P-011(2017)

Canelada Lozzia M.I., Guillén S.C., Grancelli S.M., Vidal P.J., Arraiza M.P., Reguera M.C. Aplicación de un sistema de alarma de insostenibilidad ambiental en producción de plantas ornamentales, florales, aromáticas, medicinales y condimenticias bajo cubierta, Tucumán, Argentina. Revista Agronómica del Noroeste Argentino 36 (1): 20 (2016)

FAO 2020. Herramienta para la Evaluación del Desempeño de la Agroecología (TAPE). En: http://www.fao.org/agroecology/tools-tape/es/ (2020)

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. An international framework for evaluating sustainable land management. En: http://www.fao.org/3/T1079E/T1079E00.htm (1993)

Flores C.C., Sarandón S.J. 2015. Evaluación de la sustentabilidad de un proceso de transición agroecológica en sistemas de producción hortícolas familiares del Partido de La Plata, Buenos Aires, Argentina. Rev. Fac. Agron. La Plata (2015) Vol 114 (Núm. Esp.1) Agricultura Familiar, Agroecología y Territorio 52-66 (2015)

Gobierno de Tucumán, Registro Oficial de Leyes y Decretos. Reglamenta Rirulo III, Capítulo 4, de la Ley Nº 6253 del Impacto Ambiental. En:
http://rig.tucuman.gov.ar/leyes/scan/scan/decretos/1991/D-2204-3-ME-25101991.pdf (1991)

Gramajo Antuz P. 2020. Informe SENASA Tucumán, Oficina Local Simoca. Informe generado a solicitud de los autores (2020)

Guillén S.C.Modelo de Valoración de la sostenibilidad en agroecosistemas subtropicales. Tucumán, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España, p. 322 (2008)

Iraola Jerez J, Dios-Palomares R. Indicadores ambientales en el sector ganadero de bovinos de engorde. ETSIAM. Universidad de Córdoba, España. En: https://www.researchgate.net/publication/319532112_Indicadores_ambientales_en_el_sector_ganadero_de_bovinos_de_engorde (2016).

Martínez Santa-María C., Fernández Juste J.A. El régimen natural de caudales: una diversidad imprescindible, una diversidad predescible. ForestSystems Vol15 (4) (2006)

Masera Cerutti O., Astier M., López-Ridaura S. 1 Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. El marco de evaluación MESMIS. Ed. Mundi-Prensa, GIRA, UNAM, México, D.F. pp 284. En https://www.researchgate.net/publication/31712300_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_el_marco_de_evaluacion_MESMIS_O_Masera_Cerutti_M_Astier_S_Lopez-Ridaura (1999)

OECD Organization for Economic Cooperation and Development. 1993. Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews: A synthesis report by the Group on the State of the Environment. Organisation for Economic Co-operation and Development, Number 83, Paris. En http://enrin.grida.no/htmls/armenia/soe2000/eng/oecdind.pdf. (1993)

Organización de Naciones Unidas. 2007. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies Third Edition. En
http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf.

Ponce del Valle M., Vicari C., Fraveli M. F., Glauber C., Winter N. y colaboradores. Manual de Bienestar Animal. Un enfoque práctico para el buen manejo de especies domésticas durante su tenencia, producción, concentración y transporte a faena. Versión 1. 146p. SENASA.

Pordomingo A.J. Gestión Ambiental en el Feedlot. Guía de buenas prácticas. 99 p. INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2003)

Röös, E., Sundberg, C. y Hansson, P.A. Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1, EcoProduction. Springer Singapore, Singapore (2014)

Tamashiro, S. 2018. Feedlots: Una actividad con fuerte impacto en el ambiente. En: http://sobrelatierra.agro.uba.ar/feedlots-una-actividad-con-fuerte-impacto-en-el-ambiente/ (2018)

PERIODICIDADES EN INDICADORES PALEOCLIMÁTICOS DURANTE EL PLEISTOCENO TARDÍO

Cappellotto L.[a], Orgeira M. J.[a] y Velasco Herrera V. M.[b]

[a] *IGEBA, Universidad de Buenos Aires-CONICET, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales;Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Instituto de Geofísica, Observatorio de Radiación Solar, MÉXICO*

e-mail: lcappellotto@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

Los ciclos de Milankovitch en los parámetros orbitales de la Tierra han sido considerados como la causa principal de las variaciones periódicas en las glaciaciones cuaternarias, ejerciendo una importante influencia en los mecanismos de expansión y retroceso de los grandes mantos de hielo del Pleistoceno. Numerosos autores destacaron que la oblicuidad o la combinación de precesión y oblicuidad podrían haber influido en las desglaciaciones del Pleistoceno tardío. Los veranos largos en el hemisferio sur también podrían haber contribuido al retroceso glacial.
El último interglacial anterior al presente se encuentra representado en el Estadío Isotópico Marino 5 (EIM 5, ~130-75 ka). Durante el pico de este interglacial (EIM 5e, ~130-116 ka), la oblicuidad del eje de rotación terrestre y la excentricidad de la órbita eran altas y en cuanto a la precesión, el verano del hemisferio norte coincidía con el perihelio (mayor cercanía entre la Tierra y el Sol).
Sin embargo, éstos no son los únicos forzantes climáticos que han actuado y actúan modificando el clima. El comportamiento del campo magnético terrestre (CMT) adquirió particular importancia en los últimos años, en especial en relación con la disminución de su intensidad, que puede conducir a la inversión de su polaridad. Durante los lapsos de debilitamiento y/o ausencia del CMT, se produce la entrada de rayos cósmicos provenientes del espacio que, a su vez, afectan de manera directa e indirecta el clima. Esto resulta relevante frente a la notable tendencia a la disminución de la fuerza del momento dipolar en registros continuos desde 1840 hasta la actualidad.
En esta contribución, se realizaron Transformadas Wavelet para representar periodicidades en determinados indicadores paleoclimáticos en los últimos 150 ka, obtenidos a partir de series de datos, y establecer una relación con el CMT. Los espectros presentan periodicidades relacionadas principalmente con los ciclos típicos de los parámetros orbitales.

Palabras Clave: Pleistoceno tardío, parámetros orbitales, campo magnético terrestre, wavelet.

INTRODUCCIÓN

Durante el Pleistoceno, los glaciares han avanzado y retrocedido en reiteradas oportunidades, principalmente como consecuencia de los cambios en la insolación. Una de las principales causantes de esos cambios es la ciclicidad de los parámetros orbitales y del eje de rotación terrestre, conocidos como ciclos de Milankovitch (Milankovitch, 1941). Estos parámetros son la excentricidad (la forma ligeramente elíptica de la órbita terrestre alrededor del Sol, con ciclos de ~100 ka y 400 ka), oblicuidad o inclinación (oblicuidad del eje con respecto a la eclíptica, con ciclos de ~41 ka) y precesión (relación

entre los momentos de los equinoccios y solsticios y la mayor o menor distancia entre la Tierra y el Sol, con ciclos de ~23 ka) (ver Fig. 1).
Numerosos autores consideraron que la oblicuidad (Liu, 1998; Huybers y Wunsch, 2005; Huybers, 2007) o la combinación de precesión y oblicuidad (Imbrie y Imbrie, 1980; Berger et al. 1999; Tziperman et al. 2006; Huybers, 2011) podrían haber influido en las desglaciaciones del Pleistoceno (Berger, 1988; Saltzman, 2002). Esto se debe principalmente a que durante el Pleistoceno temprano los ciclos glaciares ocurrieron en una escala de tiempo de ~40 ka, comúnmente atribuidos a los ciclos de oblicuidad (Raymo y Nisancioglu, 2003; Huybers, 2006, entre otros); y durante el último millón de años (Pleistoceno tardío) las oscilaciones climáticas tuvieron periodicidades principalmente de ~100 ka.

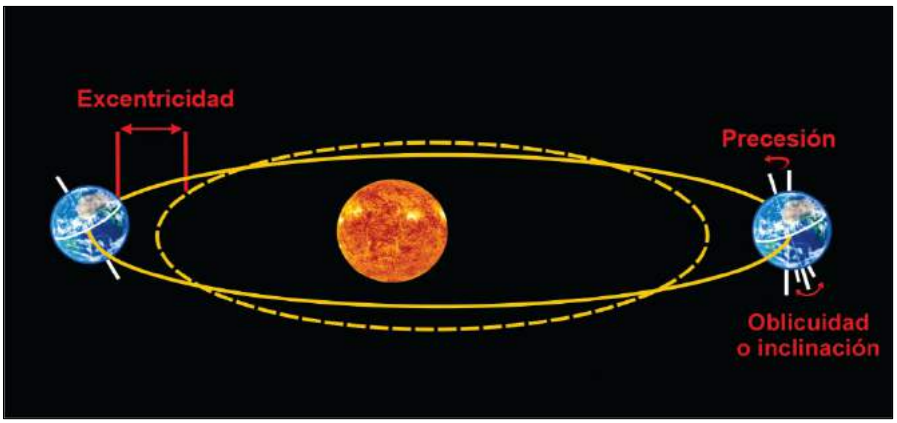


Figura 1. Parámetros correspondientes a la órbita y el eje terrestre.

El ciclo de 400 ka de la excentricidad no resulta representativo en el volumen de hielo del Pleistoceno tardío. En cuanto a las variaciones de 100 ka por cambios de excentricidad, Imbrie et al. (1993) no las consideraron capaces de causar directamente los ciclos glaciares. Huybers y Wunsch (2005) probaron estadísticamente que las capas de hielo del Pleistoceno tardío retrocedieron en momentos de alta oblicuidad, omitiendo uno o dos ciclos de oblicuidad, que equivale a duraciones de 80 o 120 ka. Asimismo, Lisiecki (2010) sugiere que es poco probable que la excentricidad actúe como forzante directo e independiente en el ciclo de 100 ka, ya que intervendrían retroalimentaciones internas del sistema climático. Además, propone un fuerte forzamiento de precesión que interrumpiría la formación de ciclos de 100 ka.
Durante los períodos interglaciares, tales como el considerado en esta contribución, el Estadío Isotópico Marino 5 (EIM 5, ~130-75 ka), último interglaciar antes del presente, los parámetros orbitales presentaban características particulares. A su vez, el EIM 5 se encuentra dividido en cinco subestadíos (a, b, c, d y e) (ver Fig. 2). Berger et al. 2007 presentaron valores para los parámetros orbitales durante el pico del interglaciar (EIM 5e, ~130-116). Los valores de excentricidad eran altos (hasta 0.0414 a los 115 ka) y, a su vez, como la excentricidad modulaba la amplitud de la señal de precesión, sus valores también eran altos. El verano del hemisferio norte (HN) se produjo durante el perihelio (máxima cercanía entre la Tierra y el Sol) a los 127 ka, por lo que los contrastes estacionales eran mucho más agudos que en la actualidad. Es decir que durante el verano la insolación era mucho mayor que en el presente y durante el invierno mucho menor. Hacia el final del EIM 5e, a los 116 ka, el verano del HN ocurría durante el afelio (máxima lejanía entre la Tierra y el Sol). El ángulo de perihelio a los 115 ka era casi opuesto, por lo que sería el final de la fase cálida y comienzo del clima frío característico del EIM 5d. La oblicuidad

presentaba variaciones desde valores máximos (24.259) a los 131 ka, hasta valores mínimos (22.316) a los 112 ka (Berger et al., 2007). Además, en ese trabajo, muestran desviaciones positivas de la insolación de 137 a 121 ka en todas las latitudes, con valores máximos a los 128 ka en el Polo norte, y desviaciones negativas de 121 a 111 ka, con valores mínimos en el Polo Norte a 116 ka. La irradiancia media estacional sería una función de oblicuidad y precesión.

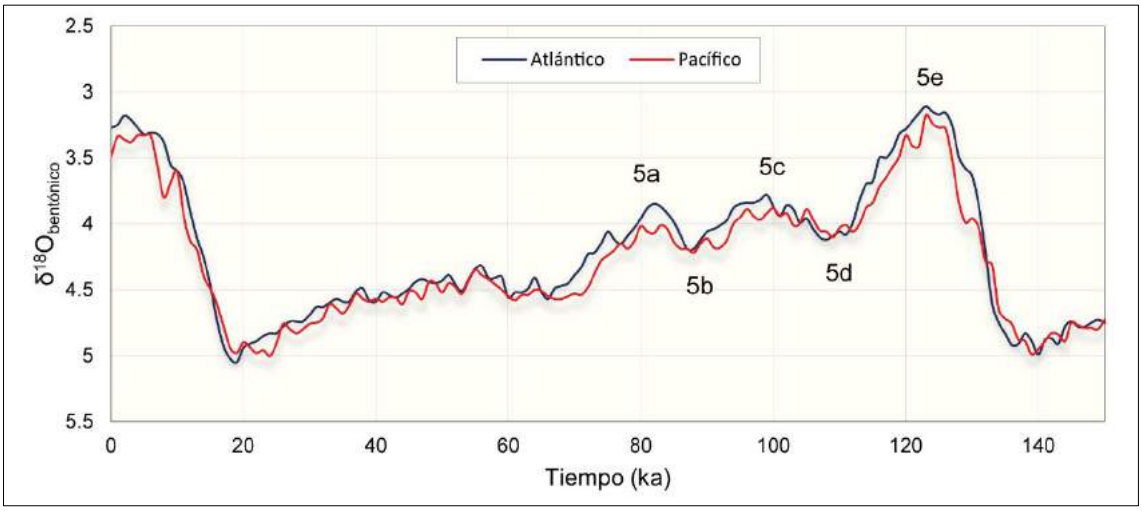


Figura 2. Gráfico que representa los registros de $\delta^{18}O$ para los océanos Atlántico y Pacífico (datos extraídos de Lisiecki y Raymo, 2009) y los subestadíos correspondientes al EIM 5.

Sin embargo, los parámetros orbitales de la Tierra no son los únicos forzantes climáticos que han actuado y actúan modificando el clima. Orgeira et al. (2016) presentaron una breve revisión de los diferentes factores naturales involucrados en el cambio climático. Uno de estos es el campo magnético terrestre (CMT), cuyo comportamiento y variaciones en el tiempo adquirieron particular importancia en los últimos años. Orgeira et al. (2016) y Kitaba et al. (2017) confirmaron la conexión entre las variaciones del CMT durante la reversión de su polaridad y los cambios climáticos que ocurrieron en el Cenozoico tardío. El CMT brinda blindaje para nuestro planeta ante la entrada de partículas provenientes del espacio, tales como los rayos cósmicos galácticos (RCG). El debilitamiento del CMT durante los períodos de baja intensidad magnética y, por consiguiente, la disminución de sus propiedades de blindaje, serían fundamentales en el incremento de la entrada de RCG en la atmósfera terrestre. Esto afectaría de manera directa e indirecta el clima, a través de la formación de una capa de nubes bajas que, a su vez, aumentarían el albedo (porcentaje de luz solar reflejada al espacio sin calentar la Tierra). Este fenómeno, conocido como efecto “umbrella” (Kitaba et al. 2017) provocaría una reducción de la insolación y, en consecuencia, también de la temperatura.

Asimismo, durante el Pleistoceno tardío y en el contexto del EIM 5, más precisamente entre ~116 y 112 ka B.P. (Osete et al. 2012) tuvo lugar el subcron de polaridad reversa Blake, con la consecuente baja intensidad magnética.

En esta contribución, se realizaron Transformadas Wavelet para representar periodicidades en series de datos representativas de determinados indicadores paleoclimáticos en los últimos 150 ka, con el fin de representar los forzantes que podrían haber influido en el sistema climático. En cuanto al CMT, se analiza su comportamiento en relación con esos proxies.

Cabe destacar que actualmente es notable la tendencia a la baja de la fuerza del momento dipolar del CMT en registros continuos desde 1840. Sin embargo, aún no se sabe de

manera certera si nos dirigimos a una reversión de polaridad del CMT y cómo se relacionaría el comportamiento del CMT con los cambios en la insolación.

METODOLOGÍA

Las series de datos utilizadas para el análisis mediante Transformadas 'Wavelet' corresponden a distintos proxies o indicadores paleoclimáticos que pueden representar el comportamiento del clima en los últimos 150 ka.

En primer lugar, se consideraron los registros de $\delta^{18}O$ bentónico de 20 sitios del Atlántico (Lisiecki y Raymo, 2009), principales indicadores de los cambios en el volumen de hielo y, por lo tanto, de paleotemperaturas (ver Fig. 2). Por otro lado, se tomaron los registros de alturas del nivel del mar global (en metros, Spratt y Lisiecki, 2016), vinculados principalmente al inicio de los períodos glaciales e interglaciales. Ambas series están representadas en tiempo y abarcan los últimos 150 ka.

El análisis de wavelet u ondículas, propuesto por primera vez por Grossmann y Morlet (1984) es una herramienta relevante en el análisis de series de tiempo, especialmente para analizar cambios temporales en un espectro de potencia (bandas espectrales de frecuencias). Es decir, permite examinar la variación del espectro de potencia con el tiempo y obtener periodicidades o frecuencias en las series. Al descomponer una serie de tiempo en un espacio de tiempo-frecuencia, se pueden determinar cuál es la variabilidad dominante y cómo varía en el tiempo (Torrence y Compo, 1998).

Frick et al. (1997) y Soon et al. (1999) presentaron una breve introducción y discusión sobre el uso de la transformada wavelet para el análisis de series de tiempo. Estos autores utilizan la ondícula de Morlet como función inicial, ya que proporciona una mayor resolución de periodicidad (es decir, de frecuencia) y, debido a su complejidad, permite contemplar la información sobre la dependencia temporal de las propiedades espectrales. Al ser el análisis de wavelets una herramienta de gran utilidad para analizar variaciones localizadas de potencia en una serie de tiempo, numerosos estudios han utilizado la transformada wavelet para el análisis de series de tiempo vinculadas al sistema climático (Meyers et al. 1993; Wang y Wang, 1996; Baliunas et al. 1997; entre muchos otros más recientes).

Esta es una breve descripción general del análisis de ondículas. Para obtener información más detallada acerca de esta metodología, se sugiere la lectura de trabajos tales como Torrence y Compo (1998), que representan excelentes guías para describir el método utilizado.

RESULTADOS

Las variaciones en los registros de $\delta^{18}O$ bentónico en el océano Atlántico y Pacífico (Lisiecki y Raymo, 2009) es similar (ver Fig. 2); por ello se decidió realizar el análisis con wavelet sólo para el océano Atlántico. El espectro de wavelet que representa los registros de $\delta^{18}O$ bentónico de distintos sitios ubicados en el océano Atlántico (Lisiecki y Raymo, 2009), relacionados principalmente a paleotemperaturas, muestra una periodicidad de 39 ka (ver Fig. 3) con más del 95% de nivel de confianza, la cual se puede observar en el panel izquierdo de la figura y se encuentra presente en todo el intervalo de tiempo. Por otro lado, también existe un pico de menor amplitud esbozado suavemente cerca de los 25 ka, que se manifiesta a partir de los 100 ka. En el panel superior (ver Fig. 3), se puede observar el gráfico que representa la serie de datos.

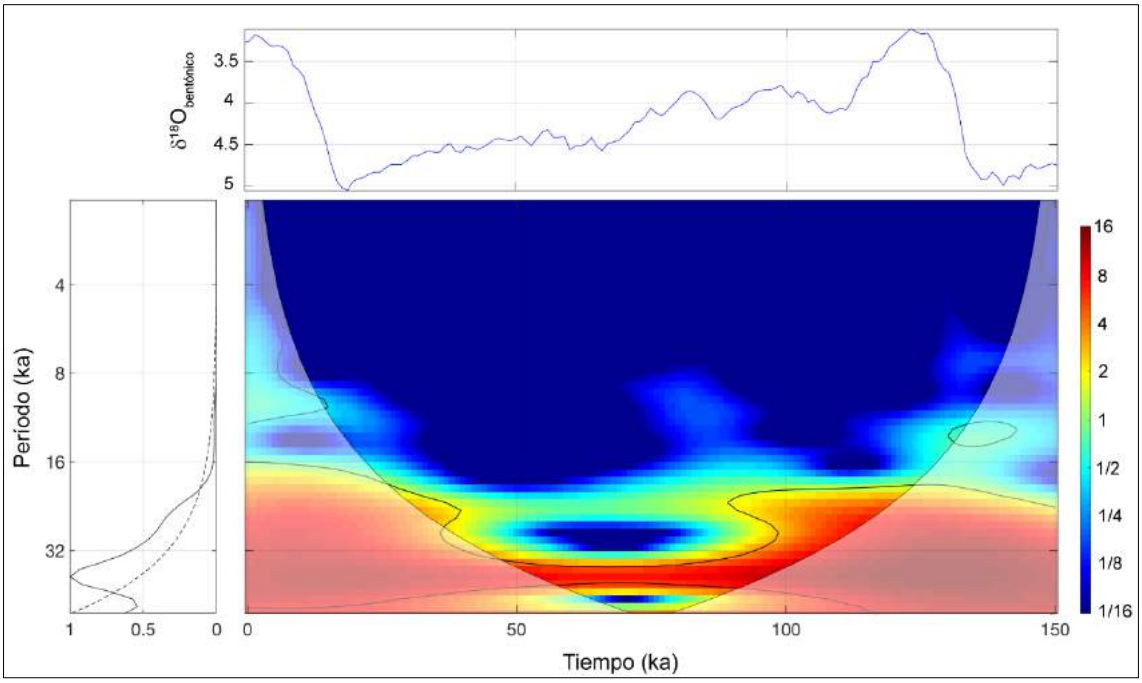


Figura 3. Espectro de wavelet que representa los registros de $\delta^{18}O$ bentónico de distintos sitios ubicados en el océano Atlántico (Lisiecki y Raymo, 2009)

En cuanto al espectro que muestra las periodicidades en las alturas del nivel del mar (Spratt y Lisiecki, 2016), presenta dos periodicidades distintivas, con un nivel de confianza de más del 95% representadas en el panel izquierdo (ver Fig. 4). Una de ellas de ~39 ka se encuentra presente en todo el intervalo y es la más prominente. La otra periodicidad, de ~24 ka, se destaca principalmente cerca de los 120 ka. En el panel superior (ver Fig. 4), se puede observar el gráfico que representa la serie de datos utilizada.

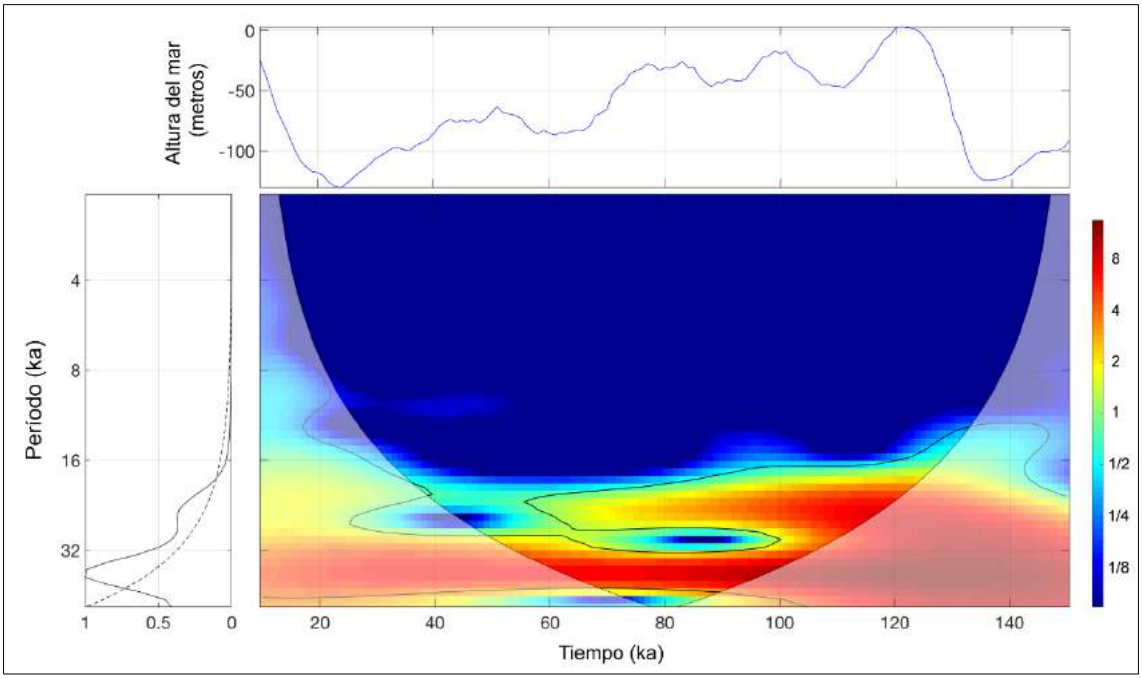


Figura 4. Espectro de wavelet que muestra las periodicidades en las alturas del nivel del mar (Spratt y Lisiecki, 2016)

DISCUSIÓN

Como proponen varios autores, los forzamientos naturales que han actuado y actúan sobre el clima son variados y la interacción entre ellos es compleja. Orgeira et al. (2016) presentaron una breve revisión de los diferentes forzantes, tales como la variabilidad solar, los cambios de la Irradiancia Solar Total a causa de los cambios en los parámetros orbitales terrestres, entre otros.

Los indicadores climáticos aquí analizados son la paleotemperatura y las consecuentes variaciones de la altura del nivel del mar. Las periodicidades encontradas en el análisis de wavelet para el lapso temporal estudiado son de ~24 y ~39 ka, por lo que los parámetros orbitales involucrados son claramente la precesión y la oblicuidad respectivamente. La periodicidad de 100 ka que caracterizaría el último millón de años no se observa debido al lapso seleccionado para el presente análisis.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, algunos autores (Orgeira et al. 2016; Kitaba et al. 2017) propusieron una conexión entre el debilitamiento del CMT durante la reversión de su polaridad y los cambios climáticos ocurridos en el Cenozoico Tardío. Al disminuir y/o desaparecer el efecto de blindaje que ejerce el CMT sobre la Tierra, se produce un aumento en la entrada a la atmósfera de RCG provenientes del espacio, los cuales favorecen la formación de nubosidad que aumenta el albedo. De esta manera, debido a la reducción de la insolación por el aumento del albedo, el flujo de RCG podría conducir a un enfriamiento climático.

Fuller (2006) y Thouveny et al. (2008) sugieren que los mínimos en el dipolo magnético terrestre registrados globalmente durante el Cron Brunhes ocurrieron durante paleoclimas interglaciares o de transición con baja o decreciente oblicuidad.

Durante el Pleistoceno tardío y puntualmente durante el EIM 5, la excursión del CMT Blake ocurrió entre ~116 y 112 ka BP (Osete et al. 2012), probablemente durante el EIM 5d (Rossi et al. 2014), en coincidencia con valores mínimos de insolación y de oblicuidad (valores mínimos a los 112 ka, Berger et al. 2007). El EIM 5d se caracterizó por un enfriamiento climático, en comparación con el estadío precedente (EIM 5e) que representa el pico del último interglaciar anterior al presente. En consecuencia, habría una sinergia positiva entre las variaciones de los parámetros orbitales y la reversión del CMT, que simultáneamente promoverían un enfriamiento en el clima.

CONCLUSIONES

Las periodicidades más significativas representadas en el espectro global de wavelet en esta contribución se encuentran vinculadas principalmente a la ciclicidad de los parámetros orbitales terrestres en los últimos 150 ka. Tanto los registros de alturas del nivel del mar como los de paleotemperaturas presentan periodicidades coincidentes con los ciclos típicos de la oblicuidad y la precesión.

La influencia del CMT durante las reversiones parece ser importante en este lapso, debido a la presencia de la excursión Blake. La disminución de la intensidad del dipolo magnético terrestre favorecería la entrada de RCG, promoviendo el aumento de nubes bajas y, por consiguiente, el enfriamiento climático que ocurrió durante el EIM 5d, luego del pico máximo del interglaciar (EIM 5e) caracterizado por las máximas alturas de nivel del mar.

La relación entre estas periodicidades y el comportamiento del CMT aún es debatida. Sin embargo, resulta de singular importancia la coincidencia que se observa en este lapso entre los cambios en la insolación y la reversión del CMT.

REFERENCIAS

Baliunas, S., Frick, P., Sokoloff, D. y Soon, W. Time scales and trends in the central England temperature data (1659–1990): A wavelet analysis. *Geophysical Research Letters*, *24*(11), 1351-1354 (1997).

Berger, A. Milankovitch theory and climate. *Rev. Geophys.* **26**, 624–657 (1988).

Berger, A., Li, X. y Loutre, M. Modelling northern hemisphere ice volume over the last 3Ma. *Quat. Sci. Rev.* **18**, 1–11 (1999).

Berger, A., Loutre, M.F., Kaspar, F. y Lorenz, S.J. Insolation during interglacial. In *Developments in Quaternary Sciences* (Vol. 7, pp. 13-27). Elsevier (2007).

Frick, P., Baliunas, S. L., Galyagin, D., Sokoloff, D. y Soon, W. Wavelet analysis of stellar chromospheric activity variations. The Astrophysical Journal, 483(1), 426 (1997).

Fuller, M. Geomagnetic field intensity, excursions, reversals and the 41,000-yr obliquity signal. *Earth and Planetary Science Letters*, *245*(3-4), 605-615 (2006).

Grossmann, A. y Morlet, J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM journal on mathematical analysis*, *15*(4), 723-736 (1984).

Huybers, P. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing. *Science*, *313*(5786), 508-511 (2006).

Huybers, P. Glacial variability over the last two million years: an extended depth-derived agemodel, continuous obliquity pacing, and the Pleistocene progression. *Quat. Sci. Rev.* **26**, 37–55 (2007).

Huybers, P. Combined obliquity and precession pacing of late Pleistocene deglaciations. *Nature* **480,** 229–232 (2011).

Huybers, P. y Wunsch, C. Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations. *Nature* **434**, 491–494 (2005).

Imbrie, J. y Imbrie, J. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science* **207**, 943–953 (1980).

Imbrie, J., Berger, A., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A. y Mix, A.C. On the structure and origin of major glaciation cycles 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, *8*(6), pp.699-735 (1993).

Kitaba, I., Hyodo, M., Nakagawa, T., Katoh, S., Dettman, D.L. y Sato, H. Geological support for the umbrella effect as a link between geomagnetic field and climate. Sci. Rep. 7, 40682 (2017).

Lisiecki, L.E. Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle. *Nature geoscience*, *3*(5), pp.349-352 (2010).

Lisiecki, L.E. y Raymo, M.E. Diachronous benthic δ18O responses during late Pleistocene terminations. *Paleoceanography*, *24*(3) (2009).

Liu, H. Phase modulation effect of the Rubincam insolation variations. *Theor. Appl. Climatol.* **61**, 217–229 (1998).

Meyers, S.D., Kelly, B.G. y O'Brien, J.J. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly weather review*, *121*(10), 2858-2866 (1993).

Milankovitch, M. History of radiation on the Earth and its use for the problem of the ice ages. K. Serb. Akad. Beogr (1941).

Orgeira, M.J., Sinito, A.M. y Compagnucci, R.H. The influence of the geomagnetic field in climate changes. En: Gasparini, G. et al. (eds.) Marine Isotope Stage 3 in Southern South America, 60 ka BP–30 ka BP, p. 49–80. Springer, Cham (2016).

Osete, M. L., Martín-Chivelet, J., Rossi, C., Edwards, R. L., Egli, R., Muñoz-García, M. B., Wang, X., Pavón-Carrasco, J. y Heller, F. The Blake geomagnetic excursion recorded in a radiometrically dated speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, *353*, 173-181 (2012).

Raymo, M.E. y Nisancioglu, K.H. The 41 kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery. *Paleoceanography*, *18*(1) (2003).

Rossi, C., Mertz-Kraus, R. y Osete, M.L. Paleoclimate variability during the Blake geomagnetic excursion (MIS 5d) deduced from a speleothem record. *Quaternary Science Reviews*, *102*, 166-180 (2014).

Saltzman, B. Dynamical Paleoclimatology, Int. Geophys. Ser., 80, 354 pp. (2002).
Soon, W., Frick, P., y Baliunas, S. Lifetime of surface features and stellar rotation: A wavelet time-frequency approach. *The Astrophysical Journal Letters*, *510*(2), L135.Spratt, R.M. y Lisiecki, L.E., 2016. A Late Pleistocene sea level stack. *Climate of the Past*, *12*(4), pp.1079-1092 (1998).
Spratt, R.M. y Lisiecki, L.E. A Late Pleistocene sea level stack. *Climate of the Past*, *12*(4), 1079-1092 (2016).
Thouveny, N., Bourlès, D.L., Saracco, G., Carcaillet, J.T. y Bassinot, F. Paleoclimatic context of geomagnetic dipole lows and excursions in the Brunhes, clue for an orbital influence on the geodynamo? *Earth and Planetary Science Letters*, *275*(3-4), 269-284 (2008)
Torrence, C., y Compo, G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, *79*(1), 61-78 (1998).
Tziperman, E., Raymo, M., Huybers, P. y Wunsch, C. Consequences of pacing the Pleistocene 100 kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing. *Paleoceanography* **21**, PA4206 (2006).
Wang, B. y Wang, Y. Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. Journal of Climate, 9(7), 1586-1598 (1996).

INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS AL FENÓMENO DE EROSIÓN REGRESIVA EN EL RÍO COCA

Carranco F.[a], Pulupa R.[a], Coronel O.[a], Reina J.[a], Romero C.[ab] y Toainga S.[a]

[a]*Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), ECUADOR*
[b]*Departamento de Geología, Facultad de Geología y Petróleos, Escuela Politecnica Nacional, ECUADOR*

e-mail: fausto.carranco@geoenergia.gob.ec

RESUMEN

El colapso de la cascada San Rafael estuvo vinculado al fenómeno de erosión regresiva en la cuenca del rio Coca. A partir de este colapso los procesos de erosión regresiva desestabilizaron las márgenes de este rio, desencadenando una serie de movimientos en masa en las laderas y quebradas próximas, destruyendo las márgenes del rio, en donde se encuentra infraestructura de gran importancia para el desarrollo económico y social del Ecuador. En función del análisis de imágenes satelitales de alta resolución, levantamiento topográfico a detalle y trabajo de campo, esta investigación presenta la identificación y caracterización de movimientos en masa en el sector de San Rafael, en el rio Coca. En el cual se han discriminado deslizamientos complejos, movimiento complejo, deslizamientos translacionales, avalancha de escombros, flujo de detrito y caída de rocas.

Palabras Clave: Movimientos en masa, Río Coca.

INTRODUCCIÓN

En los Andes del norte, la región Sub Andina es caracterizada por el desarrollo de ríos altamente erosivos que permiten el transporte de grandes volúmenes de sedimentos desde la cordillera a la planicie amazónica (Laraque, et al., 2014).

Al norte de la región Sub Andina ecuatoriana, el levantamiento Napo es caracterizado por la presencia de los volcanes Sumaco y El Reventador. En el flanco oriental del volcán El Reventador se encuentra la cuenca del rio Coca “ver Fig. 1”. En la cuenca alta del rio Coca, la cascada de San Rafael constituyó durante décadas el principal atractivo geoturístico de la región, la caída de agua alcanzó una altura de 150 m y se generó en un flujo de lava proveniente del volcán El Reventador, asentado sobre volcanosedimentos.

El 2 de febrero de 2020 la cascada de San Rafael colapsó; este colapso fue un evento de origen natural, que inició con la erosión del pie del dique natural (antigua cascada); en la actualidad, el proceso erosivo continúa afectando a materiales aluviales en los flancos del río Coca.

Este proceso fue denominado erosión regresiva, el cual consiste en la remoción súbita de material poco consolidado presente en el lecho y márgenes del drenaje(s), avanzando en sentido contrario a la dirección del cauce del río y continuará hasta que encuentre un punto de equilibrio hidráulico o nick-point (recodo, hendidura o salto brusco) producido por un material competente (roca) que detiene el proceso de erosión (Godard et al., 2010).

Una de las principales características en la evolución de la erosión regresiva en cuencas fluviales es la activación de movimientos en masa debido a la desestabilización de las márgenes (Moeyersons, 1991).

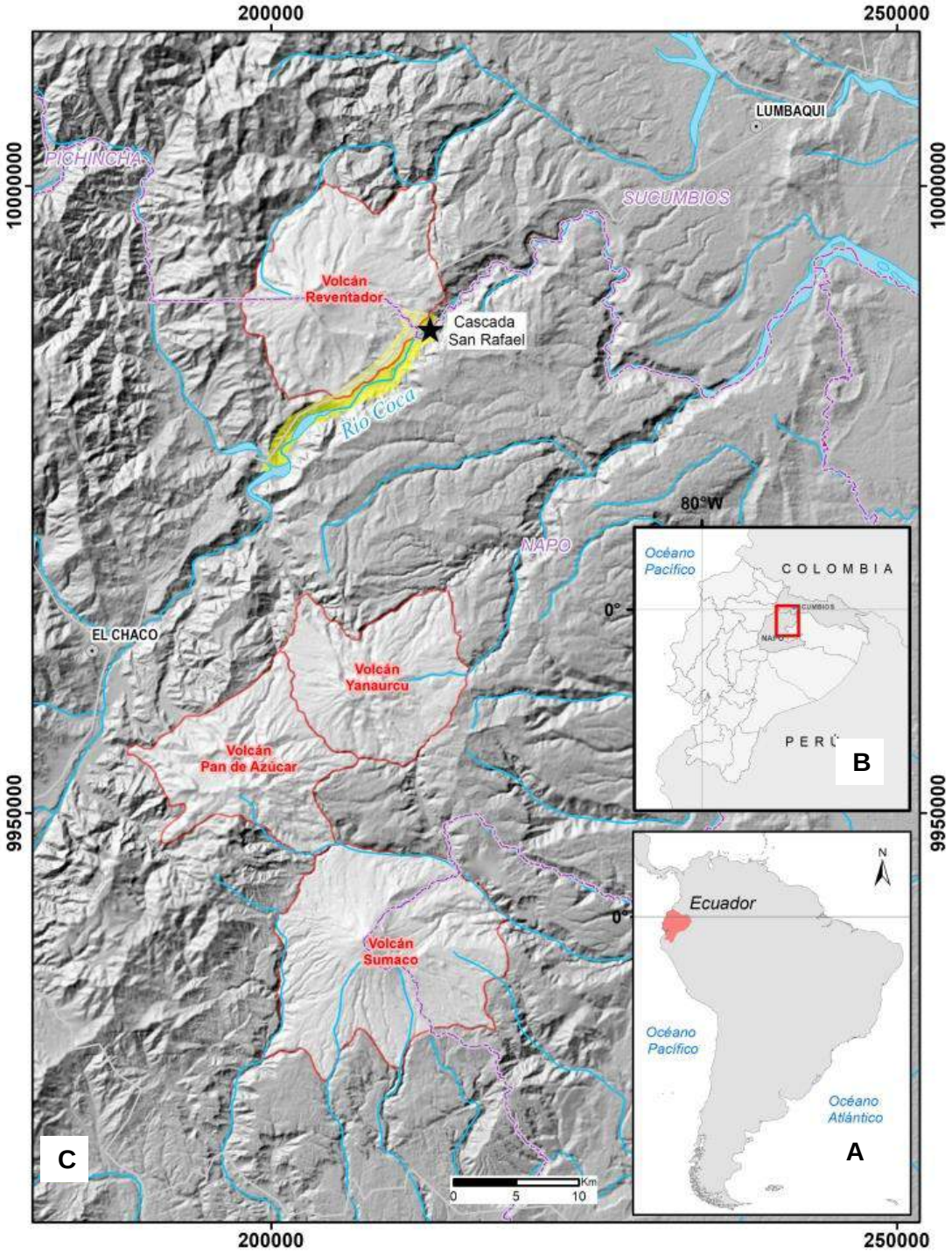


Figura 1. Ubicación del área de estudio. A. Sudamérica con Ecuador; B. Ecuador con la zona de estudio; C. Zona Sub-Andina norte con los volcanes presentes en la Cuenca del Río Coca.

El flanco occidental del rio Coca es de suma importancia para el desarrollo social y económico del Ecuador, debido a que, en este se encuentran los oleoducto de crudos pesados (OCP) y el Transecuatoriano (SOTE), el poliducto Shushufindi-Quito y la autopista E-45 (Quito – Lago Agrio), único eje vial nororiental del país y en la cabecera del rio Coca se encuentra la obra de captación de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, el proyecto hidroeléctrico más importante del Ecuador construido en la última década (Romero et al., 2020).

Producto de la desestabilización de los flancos del rio coca, en las laderas y quebradas próximas se empezaron a activar movimientos en masa que obstaculizaron parcial y completamente el cauce del rio, incrementando el riesgo a desastre por inundaciones y alud aguas abajo del sector de San Rafael, por lo cual, el estado de emergencia fue declarado. En este contexto, esta investigación presenta el inventario y categorización de movimientos en masa identificados por parte de los técnicos del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) en la cuenca del rio Coca entre los sectores de San Rafael y el río Malo.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El análisis e interpretación de imágenes satelitales de alta resolución y anáglifos, fue realizado con el fin de complementar el trabajo de campo. La topografía a detalle, escala 1: 10 000 de la zona de estudio fue generada a partir del modelo digital de superficie a través del procesamiento de las fotografías aéreas con el software PCI de donde se obtuvieron las respectivas curvas de nivel. Para la obtención del modelo digital de superficie se procesaron en el software Agisoft Photoscan, 1085 fotografías obtenidas con ayuda del dron DJI MATRICE 600 PRO.

Siguiendo a Ramírez and Giraldo, (2017), en el análisis de imágenes satelitales se describieron las principales características de las geoformas (mesas estructurales, planicies de depósito, laderas y cornisas) presentes en el área de estudio. A partir de esta descripción se identificaron escarpes y zonas de inestabilidad. En campo se analizaron a detalle cada una de estas zonas considerando a PMA: GCA, (2007) y SGC, (2015), donde se describieron los principales parámetros de cada movimiento en masa, los cuales son presentados en la Tabla 1.

En lo posterior, el trabajo de gabinete consistió en realizar una reinterpretación y un ajuste de polígonos mediante la corrección geográfica en algunos casos y delimitando cada polígono documentado en la carta topográfica de la zona de estudio. Para la representación del tipo y actividad de los movimientos inventariados, se ha considerado la simbología cartográfica sugerida por el PMA: GCA, (2007), modificada actualmente de acuerdo al *Estándar de Cartografía Geológico Ecuatoriano* (IIGE, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de imágenes satelitales se identificaron 62 polígonos que representan las áreas de los movimientos en masa, así como 184 líneas que simbolizan escarpes o cicatrices de antiguos deslizamientos. El 32,26% del total de movimientos en masa identificados por fotointerpretación fueron caracterizados en campo. El inventario de movimientos en masa se indica a continuación. “ver Tabla 1 y ver Fig. 2”.

Tabla 1. Inventario de movimientos en masa reportados.

INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA SAN RAFAEL						
CÓDIGO	**UTM X**	**UTM Y**	**ALTURA**	**TIPO**	**ESTADO**	**COLOR**
DC-1	211310	9986660	1213	Deslizamiento complejo	Inactivo	
DC-2	210961	9986588	1190	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-3	211233	9986543	1220	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-4	209554	9985619	1330	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-5	209852	9985631	1241	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-6	209387	9985947	1355	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-7	209379	9985834	1327	Deslizamiento complejo	Activo	
DC-8	206928	9984310	1296	Deslizamiento complejo	Inactivo	
DC-9	207272	9985278	1800	Movimiento complejo	Activo	
DT-1	210506	9985591	1217	Deslizamiento traslacional	Inactivo	
DT-2	208758	9983904	1204	Deslizamiento traslacional	Activo	
FD-1	209836	9986515	1386	Flujo de detritos	Activo	
FD-2	209632	9985615	1332	Flujo de detritos	Activo	
FD-3	211187	9989997	1721	Flujo de detritos	Relicto	
FD-4	211370	9989606	1543	Flujo de detritos	Activo	
FD-5	210910	9989885	1771	Flujo de detritos	Activo	
AV-1	209615	9985767	1307	Avalancha de detritos	Activo	
AV-2	209886	9985971	1275	Avalancha de escombros	Activo	
CR-1	211757	9989609	1548	Caída de rocas	Activo	
CR-2	210892	9988354	1330	Caída de rocas	Activo	

Deslizamientos Complejos (DC)

Según Varnes (1978), se denomina así, a un tipo de movimiento en masa que involucra una combinación de uno o más de los tipos principales de movimientos; es común observar estas interacciones dentro de los diferentes componentes de la masa en movimiento, o en los diferentes estados de desarrollo del movimiento.
Las principales exposiciones de deslizamientos complejos se presentan en la margen derecha del río Coca **DC-1**: 211310E, 9986660N; **DC-2**: 210961E, 9986588N; y **DC-3**: 211233E, 9986543N; y en la quebrada Piedra Fina: **DC-4**: 209554E, 9985619N; **DC-5**: 209852E, 9985631N; **DC-6**: 209387E, 9985947N; **DC-7**: 209379E, 9985834N; Así como en el sector de San Luis: **DC-8**: 206928E, 9984310N; y **DC-9**: 207272E; 9985278N “ver Fig. 2 y Fig. 3A-B”.
Los deslizamientos complejos representan el 45% del total de los movimientos en masa inventariados. El 77,78% de estos se presentan activos en un rango de pendientes entre 40° a 60°, con áreas promedio de 7681 m^2 y volúmenes de aproximadamente 54000 m^3; e involucran materiales moderadamente meteorizados y sobresaturados correspondientes a avalanchas volcánicas antiguas “ver Tabla 2”.

Deslizamientos Traslacionales (DT)

En un deslizamiento traslacional la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. Según Lomoschitz y Corominas, (1997) si la traslación se realiza a

través de un solo plano se denomina deslizamiento planar, pero cuando se realiza por dos planos de discontinuidad que se intersectan entre sí e intersectan la cara de la ladera o talud, se denomina deslizamiento en cuña. La velocidad de los deslizamientos traslacionales puede variar desde rápida a extremadamente rápida (PMA: GCA, 2007).
Las mejores exposiciones de deslizamientos traslacionales se presentan en la margen derecha del río Coca **DT-1**: 210506E, 9985591N y en el sector de ventana 2 **DT-2**: 208758E, 9983904N "ver Fig. 2 y Fig. 3C-D".
Los movimientos en masa de tipo traslacional representan el 10% del total de los deslizamientos caracterizados en el levantamiento de información de campo. El 50% se encuentra en estado activo, tienen un rango de pendientes entre 35° a 50°, en áreas promedio de 18000 m^2 y volúmenes de aproximadamente 0,17 x 10^6 m^3. Los materiales litológicos involucrados en este tipo de eventos corresponden a macizos rocosos moderadamente meteorizados y sobresaturados correspondientes a avalanchas volcánicas antiguas de El Reventador "ver Tabla 2".

Flujos de Detritos (FD)

Son movimientos en masa que durante su desplazamiento exhiben un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco (Meza Aliaga, et al., 2014). Su origen puede estar relacionado a otro tipo de movimiento en masa. Es importante hacer la distinción entre los diferentes tipos de flujos cuando se analiza la amenaza, ya que el potencial destructivo es característico de cada tipo (PMA: GCA, 2007).
Los flujos de detritos fueron localizados en margen izquierdo del río Coca, **FD-1**: 209836E, 9986515N; en la margen derecha del río Piedra Fina: **FD-2**: 209632E, 9985615N; en las proximidades al OCP al norte de la hostería El Reventador: **FD-3**: 211187E, 9989997N; en la vía Lago Agrio-Quito: **FD-4**: 211370E, 9989606N y en la margen izquierda del río Reventador: **FD-5**: 210910E, 9989885N "ver Fig. 2 y Fig. 3E-F".
Los flujos correspondes al 25% del total de movimientos en masa inventariados y caracterizados. Generalmente se presentan en rangos de pendientes entre 30° y 60°, con espesores de 16 metros en promedio. El 80% de este tipo de eventos se encuentran activos, con superficies estimadas de 35800 m^2 y volumen promedio de aproximadamente 762257 m^3. En la mayoría de flujos se observa materiales semi consolidados y sobresaturados de las avalanchas volcánicas antiguas "ver Tabla 2".

Avalanchas (AV)

La avalancha corresponde a un flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápido (Vargas Cuervo, 2000). Estos movimientos comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos y ante la ausencia de canalización la materia en movimiento sufre de una considerable distorsión interna. Estos movimientos, no tienen una clasificación granulométrica en sentido longitudinal, ni tampoco un frente de material grueso en la zona distal (PMA: GCA, 2007).
Las avalanchas fueron identificadas en la margen izquierda del río Coca en las coordenadas: AV-1: 209615E, 9985767N y en la vía Lago Agrio-Quito: AV-2: 209886E, 9985971N "ver Fig. 2 y Fig. 3G-H".

Las avalanchas representan el 10% del total de movimientos en masa catalogados. La totalidad de estos eventos se encuentran en estado activo, generalmente en rangos de pendientes de 50° y 75°. Se estiman promedios de superficie de 700 m^2 con espesores de 2 metros, en consecuencia, se calcula un volumen promedio de 1400 m^3. Las avalanchas son eventos superficiales en donde se observa rodados y bloques andesíticos en matriz semi consolidada y sobresaturada correspondientes a los depósitos de avalanchas volcánicas y coluviales antiguos "ver Tabla 2".

Caída de Rocas (CR)

La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (SGC, 2015). Una vez desprendido, el material cae desplazándose en la vertical, pudiéndose efectuar golpes, rebotes y rodamiento. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (PMA: GCA, 2007).
Movimientos en masa que involucran a caídas de roca pueden ser observados en la margen izquierda del rio coca, sobre la vía Quito – Lago Agrio en las siguientes coordenadas: CR-1: 211757E, 9989609N; y CR-2: 210892E, 9988354N "ver Fig. 2 y Fig. 3I-J".
Los eventos tipificados como caída de rocas corresponden al 10% del total de movimientos en masa inventariados en el área de estudio. Actualmente se encuentran en estado activo, en rangos de pendientes de entre 45° y 75°, con espesores estimados en 5 metros. Se registran datos promedio de superficie y volumen entre 77400 m^2 y 769250 m^3 respectivamente. Los bloques y rodados andesíticos que se desprenden de los taludes, forman parte de los depósitos moderadamente meteorizados de avalanchas volcánicas antiguas procedentes del Volcán El Reventador "ver Tabla 2".
A continuación, se detalla un resumen de las características morfométricas, rasgos fisiográficos, clasificación, estado de actividad y los principales parámetros físicos documentados en campo, para los 20 movimientos en masa inventariados en el Estudio San Rafael "ver Tabla 2; Fig. 2; Fig. 3".

Tabla 2. Características morfométricas de los movimientos en masa reportados.

RESUMEN DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA					
PARAMETROS	**CLASIFICACIÓN**				
	Complejo	**Traslacional**	**Flujo**	**Avalancha**	**Caída**
Número de Eventos	9	2	5	2	2
Espesor estimado de la masa deslizada (m)	10	7,5	16	1,92	5
Área promedio de la masa desplazada (m^2)	7681	18052	35789	666	1607,5
Volumen promedio aproximado (m^3)	53905	176839	762257	1317,83	12762,5
Estado de actividad (% activos)	77,78	50	80	100	100
Rango de pendientes	40° - 60°	35°-50°	30° - 60°	50°-75°	45° - 75°

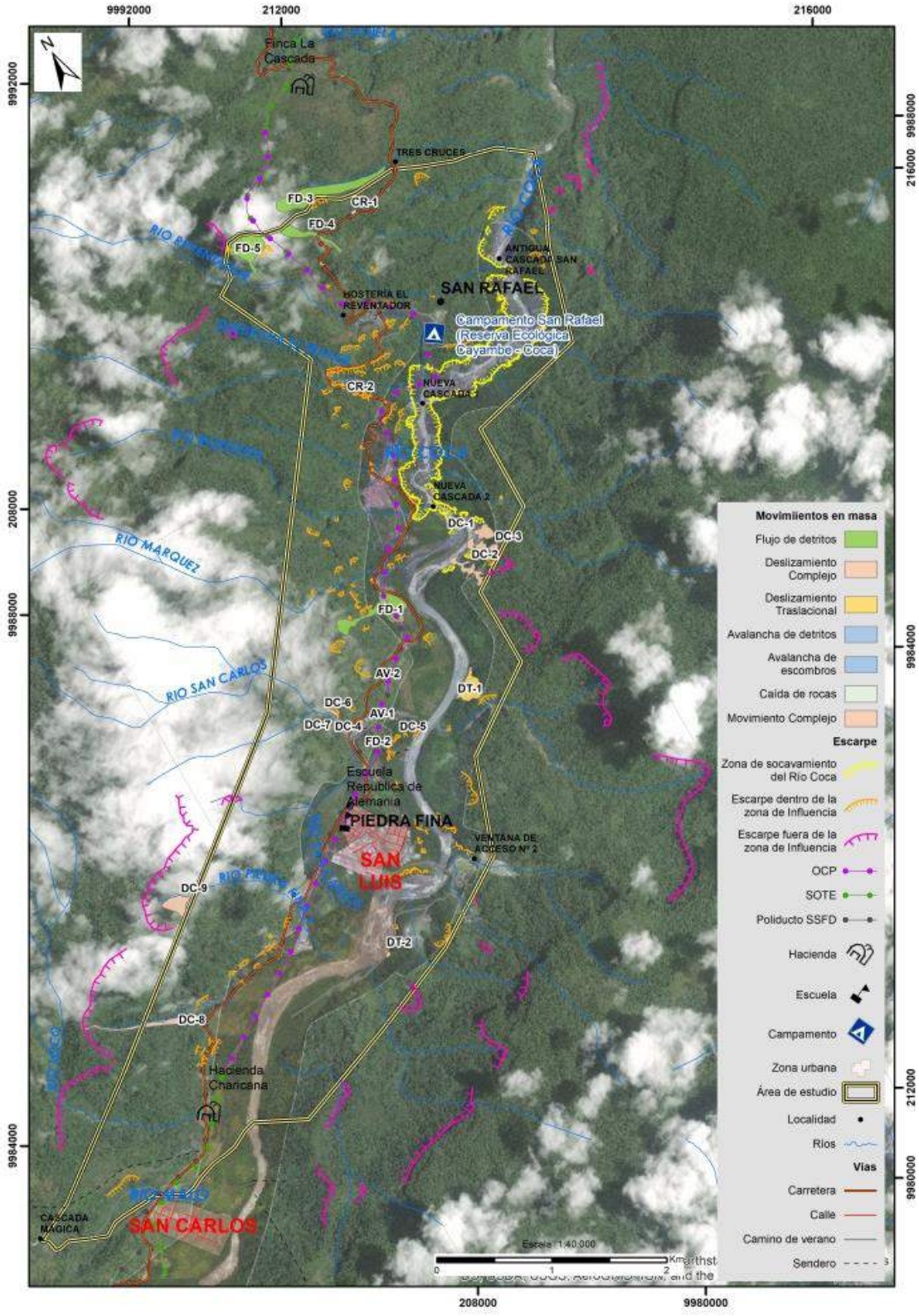


Figura 2. Mapa inventario de movimientos en masa San Rafael.



Figura 3. Imágenes representativas de los movimientos en masa caracterizados.

Los diferentes tipos de movimientos en masa inventariados en la zona de estudio, se han originado de acuerdo a los factores condicionantes como: el factor geológico, que está relacionado con la calidad, sensibilidad, meteorización física de los macizos rocosos y disposición de los materiales superficiales; y, el factor geomorfológico, que considera la forma de las laderas y los ángulos de inclinación de las pendientes.
Los factores detonantes no están plenamente identificados, pero probablemente están relacionados con el factor sísmico (movimientos tectónicos), relacionados a los diferentes sismos y/o eventos volcánicos; y el factor hidrogeológico inducido por las altas precipitaciones, principalmente en la época de invierno, que provoca la sobresaturación de agua en los depósitos volcánicos de avalancha (Volcán El Reventador).
La pérdida del cauce original del río Coca (ex cascada de San Rafael) provocó un desequilibrio hidráulico en el lecho del río y sus afluentes, lo que ocasionó una erosión fluvial del material poco consolidado (avalancha volcánica), originando un socavamiento en vertical de hasta 160 metros de altura; de esta manera, incrementó considerablemente la inestabilidad en los nuevos taludes del río y afluentes. Este proceso, desencadenó una reactivación de los diferentes tipos de movimientos en masa antiguos, así como también, la generación de nuevos movimientos en masa que ocasionalmente interrumpen de forma parcial el cauce normal del río Coca.
El volcán El Reventador se encuentra en estado activo y constantemente emite fumarolas e inclusive a veces material piroclástico, lo que incrementa exponencialmente la probabilidad de nuevos movimientos en masa de gran magnitud en el área de estudio.

CONCLUSIONES

- A partir de la identificación y caracterización de 62 zonas con influencia de movimientos en masa se discriminaron los siguientes movimientos en masa: deslizamientos complejos, deslizamientos traslacionales, flujos de detritos, avalanchas y caídas de rocas.
- En función de la descripción de los principales parámetros físicos de los movimientos en masa se determinó que los factores condicionantes presentes en el área de estudio son: geológicos (material fácilmente erosionable), geomorfológicos (ángulo de las pendientes y forma de los relieves), hidrogeológicos (humedad del terreno y sobresaturación del nivel freático) y cobertura y uso de suelo (deforestación, uso de suelo en actividades agrícolas e industriales), mientras que, los factores detonantes corresponden a las fuertes precipitaciones y los sismos probablemente generados por la actividad del volcán El Reventador.
- Las zonas propensas a movimientos en masa son aquellas que se identifican en el área de influencia directa y corresponden a los sectores con mayor densidad de movimientos en masa y escarpes, caracterizados por morfologías con relieves bajos de cimas redondeadas con pendientes entre 25 a 45 º y laderas mixtas (cóncavas y convexas).
- Las zonas propensas en el área de influencia indirecta están relacionadas a antiguos movimientos en masa o eventos geológicos que se han originado fuera del área de estudio, pero su depósito o material removido se encuentra en el área de influencia directa.

REFERENCIAS

Godard, V., Lavé, J., Carcaillet, J., Cattin, R., Bourlès, D., & Zhu, J. Spatial distribution of denudation in Eastern Tibet and regressive erosion of plateau margins. *Tectonophysics*, *491*(1-4), 253-274 (2010).

IIGE, Instituto de Investigación Geológico y Energético. *Estándar de Cartografía Geológico Ecuatoriano*. Instituto de Investigación Geológico y Energético- IIGE. (2019)

Laraque, A., Bernal, C., Pombosa, R., & Guyot, L. Hidroclimatología e Hidrosedimentología del Oriente Ecuatoriano. En: Baby, P., Rivadeneira, M. & Barragán, R. (Eds.), La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo – 3ra edición: 133–167 (2014).

Lomoschitz, A., & Corominas, J. La depresión de Tirajana, Gran Canaria. Una macroforma erosiva producida por grandes deslizamientos (1997).

Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O., & Tapia Tosetti, A. Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la quebrada de Camiña, Norte Grande de Chile. *Diálogo andino* (44), 15-24 (2014).

Moeyersons, J. Ravine formation on steep slopes: forward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda. *Catena*, 18(3-4), 309-324 (1991).

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO, PMA: GCA. Movimientos en Masa en la Región Andina, una Guía para la Evaluación de Amenazas (2007).

Ramírez, J. M., & Giraldo, E. V. A. Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. *Ingeniería y Ciencia* 13(26), 173-206 (2017).

Romero, C., Villacreses, G., Betancourt, F., & Sánchez, C. C. Alternativas para la investigación geológica en tiempos de pandemia COVID-19. *CienciAmérica* 9(2), 190-206 (2020).

SGC, Servicio Geológico Colombiano. *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.* Servicio Geológico Colombiano-SGC (2015).

Vargas Cuervo, G. Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de geología* 22(37) (2000).

Varnes, J. Slope movement types and processes. *Special report 176*, 11-33 (1978).

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS SUCESIONALES ECOLÓGICOS POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN EN EL SUR DE MENDOZA

Castaño Gañán A. R[a]

[a]*ICES, Malargüe, CNEA, ARGENTINA*

e-mail: anaro95@gmail.com

RESUMEN

Con el uso del software libre QGIS y la plataforma informática de Google Earth Engine (GEE) (https://earthengine.google.com/) se analizaron imágenes Landsat 8 y Landsat 4 para los periodos primavera-verano de los años 2019-2020 y 1982-1983 respectivamente, con el propósito de comparar cambios en la cobertura vegetal/uso del suelo en el Complejo Minero Fabril de San Rafael (CMFSR), en ese período de tiempo (37 años). Para esto, se construyeron dos mapas de cobertura/uso del suelo: uno para el año 2020 y otro para el año 1983, se calcularon las métricas asociadas a cada clase en cada fecha y se compararon los mapas deduciendo que los procesos de sucesión natural han contribuido a la revegetalización de zonas impactadas por la actividad minera llevada a cabo hasta 1997, año en el que esta actividad cesó. Las actividades propias del complejo minero cesaron hace más de 20 años. Por lo tanto, un primer factor relevante en los programas de restauración ambiental ha sido que la actividad antrópica que impactaba el sitio ya no está presente. Así mismo, la vegetación ha podido "restaurar de forma natural" algunas áreas del CMFSR, y sus alrededores, los cuales estuvieron impactados por actividad ganadera previamente desde antes que el CMFSR empezara su actividad.

Palabras Clave: Landsat, Teledetección, Restauración Ecológica

INTRODUCCIÓN

El surgimiento de herramientas de teledetección y sistemas de información geográficos, son una fuente de información necesaria al momento de caracterizar el territorio a distintas escalas en término de su cobertura vegetal/uso del suelo y del estudio del cambio en el uso de este, así como también, para la elaboración de cartografía y seguimiento de zonas de interés. Estas herramientas, sumadas a otras geotecnologías, tales como los sistemas de posicionamiento global, brindan una nueva perspectiva para la cartografía y monitoreo del territorio. La utilización de imágenes satelitales tiene gran importancia, principalmente por la capacidad de abarcar amplias zonas. Además, por la rapidez con la que se pueden obtener resultados preliminares del área que se desea estudiar y por contar con una serie de satélites, capaces de entregar información en diferentes resoluciones, y períodos de tiempo, según el objetivo propuesto. Sumado a esto, existen importantes plataformas como la de Google Earth Engine (GEE), que se encuentra *on line* para la visualización y procesamiento de imágenes satelitales y otros tipos de datos a gran escala. La plataforma permite una amplia gama de aplicaciones: detectar la deforestación, clasificar la cobertura del suelo, estimar la biomasa forestal y el carbono, entre muchos otros. Una de sus ventajas es su notable velocidad de cálculo que no depende de la capacidad de procesamiento de la computadora ya que el mismo se realiza en los servidores de Google.

El programa estadounidense Landsat es un programa conjunto entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que ofrece el catálogo más amplio de observaciones de la Tierra a nivel global. Desde su origen en 1975 hasta el día de hoy, continúa sirviendo imágenes de gran valor científico sobre nuestro planeta.
El último satélite de la constelación Landsat, es el Landsat 8, fue puesto en órbita el 11 de febrero de 2013. Los sensores embarcados en este satélite son el *Operational Land Imager (OLI)* y el *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. Estos dos sensores proporcionan imágenes a 30 metros de resolución (visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta), 100 metros (térmico) y 15 metros (pancromático). El sensor OLI proporciona, además de las clásicas bandas, una adicional para detectar cirros en la atmósfera y otra para la observación de las costas. Dado que la serie de satélites Landsat ha estado operando por un largo período de tiempo, se cuenta con una gran base de datos disponible, tanto en cobertura aérea como en cobertura repetitiva, para diferentes estaciones del año y durante períodos de desastres naturales. La cobertura con Landsat MSS existe desde 1972 hasta el presente en cuatro bandas espectrales, con una resolución de 80 m. El "thematic mapper" (graficador temático - TM) fue introducido con el Landsat 4 en 1982 con siete bandas espectrales, seis de ellas con 30 m de resolución y una en el rango térmico IR, con resolución de 120 m.

Al generar mapas de uso del suelo se necesita identificar sólo dos categorías: sin cambio y con cambio. La detección multitemporal se usa frecuentemente para identificar si la vegetación o el suelo ha cambiado, para ello se utilizan dos imágenes de satélite y se determina si hubo un cambio de vegetación en el suelo es decir si hay o no vegetación en el suelo.

Por lo general, luego de que los complejos mineros dejan de operar siguen una serie de tareas relacionadas con el desmantelamiento de instalaciones y el manejo de los pasivos ambientales generados durante el tiempo de actividad de la mina. Combatir las consecuencias de la degradación de la tierra y la contaminación por las actividades mineras debe ser prioridad. Algunas medidas correctivas pueden ser, por ejemplo, el desarrollo de vegetación, eco-restauración y fitorremediación, las cuales son actividades necesarias para estabilizar estos materiales potencialmente contaminantes (Wong 2003).

En lo que hace a los pasivos ambientales y en este caso particular a las áreas afectadas por la actividad minera, hay diferentes actividades de remediación ambiental encaminadas al mejoramiento de tales áreas. Hay una acción concreta en la remediación ambiental que es quitar la actividad de impacto y dejar que los procesos de sucesión ecológica se manifiesten. Este es un escenario presente en el Complejo Minero Fabril de San Rafael (CMFSR), sin actividad desde 1997, más de 20 años, en los cuales es posible que los procesos de sucesión vegetal hayan ido colonizando áreas que fueron afectadas durante los otros 20 años que duró la actividad en el CMFSR.

Margalef identificó a la sucesión ecológica como un proceso de autoorganización, que conlleva una disminución gradual de la entropía en paralelo a la paulatina disminución de la influencia del ambiente y al progresivo aumento de las interacciones bióticas (Margalef, 1968).

Margalef (1963, 1997) y Odum (1969, 1992) propusieron un número de tendencias generales para caracterizar cambios en el funcionamiento de los ecosistemas a lo largo de la sucesión. Margalef (1997) sintetizó su propuesta en siete argumentos que ocurren a lo largo de la sucesión: 1. La biomasa y la producción se incrementan, pero con tasas diferentes, lo que supone una disminución del cociente entre producción primaria neta y biomasa. 2. La masa de heterótrofos se incrementa con relación a la

biomasa total. 3. La longitud de las cadenas tróficas se incrementa. 4. El número de especies se incrementa y, a menudo, también la diversidad. 5. El reciclado interno de nutrientes aumenta y la tasa de renovación disminuye. 6. Los mecanismos de homeostasis devienen más efectivos, en parte gracias a una mayor longevidad de los organismos. 7. La sucesión es, por tanto, un proceso de auto-organización. En el presente trabajo, no se hicieron mediciones ni comparaciones en campo. Se valida el concepto de sucesión ecológica a partir de tener un suelo desnudo que luego es revegetalizado, iniciando interacciones que favorecen a la generación de biomasa y al mejoramiento de las condiciones necesarias para que el establecimiento y reemplazamiento de las especies vegetales sea posible. El banco de semillas presente en el suelo del CMFSR es un promotor valioso de los procesos de revegetalización (Castaño *et al*., 2018)

Los ecosistemas se recuperan por sí solos cuando no existen o se eliminan factores tensionantes o barreras que impidan su regeneración, en un proceso conocido como restauración pasiva o sucesión ecológica o natural. Es por esto por lo que una de las primeras acciones para recuperar un ecosistema que ha sido impactado por la actividad minera o ganadera, es retirar los factores que impiden la expresión de mecanismos de regeneración natural. Cuando los ecosistemas están muy degradados o destruidos, han perdido sus mecanismos de regeneración y en consecuencia es necesario asistirlos, en lo que se denomina restauración activa o asistida (sucesión dirigida o asistida). La restauración activa implica, que, con intervención humana, se ayude al ecosistema para superar estos factores tensionantes que impiden la regeneración y así garantizar el desarrollo de procesos de recuperación.

Se entiende por coberturas del suelo a los materiales presentes sobre la superficie terrestre, siendo un criterio biofísico. El uso del suelo es un criterio socioeconómico y hace referencia a las actividades que las sociedades desarrollan sobre determinados lugares y tipos de coberturas. Sin embargo, es posible inferir usos del suelo a partir del conocimiento de coberturas.

El propósito de esta investigación está en saber si el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sensores Remotos, pueden dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Se evidencian cambios en la cobertura vegetal/uso del suelo en el CMFSR desde 1982 hasta el año 2020?

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de Estudio: El Yacimiento Uranífero de Sierra Pintada, ubicado al Sur Oeste de la Villa 25 de Mayo y a una distancia aproximada de 12 km, en la provincia de Mendoza (ver Figura 1), fue descubierto en 1968, a través de una prospección radiométrica aérea, en la que pudieron identificarse una serie de anomalías, corroborando posteriormente la presencia de Uranio en la zona. A partir de 1975, se puso en funcionamiento el Complejo Minero Fabril Sierra Pintada (CMFSR), el mayor depósito argentino de uranio hasta la actualidad. Sin embargo, en 1997 el Complejo se vio en la necesidad de la detención de las actividades debido a razones de índole económico por la baja del precio internacional del comodity. El CMFSR de Sierra Pintada abarca una superficie de 2007 Ha. Dentro de la misma se realizaron todas las operaciones relacionadas a la obtención de Diuranato de Amonio como producto final.

La zona pertenece al denominado Bloque San Rafael, del cual la constitución y la historia geológica son complejas. Particularmente para el área de Sierra Pintada, sobre un basamento de terrenos antiguos (Devónico y Carbonífero), afectado por un intenso tectonismo, se desarrolló en el Pérmico inferior una profusa actividad volcánica que derivó en la acumulación de una importante secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas interdigitadas, que conforman el Grupo Cochico, ver Figura 1, (Mancilla y Dieguez, 2013). Los grandes volúmenes de ignimbritas intermedias y ácidas, debidos al vulcanismo permotriásico generaron las condiciones favorables para la concentración del yacimiento de Uranio en el CMFSR (Kleiman, 1993).

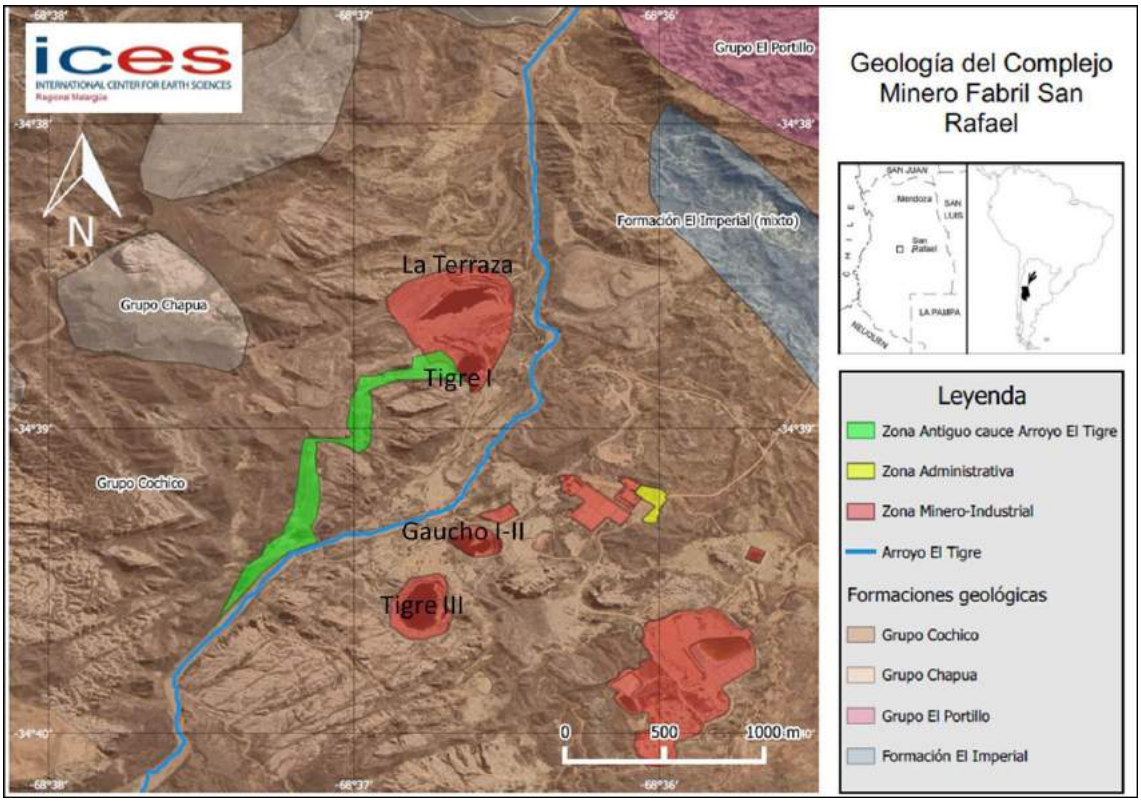


Figura 1. Mapa con la geología del CMFSR, muestra el Arroyo El Tigre, la zona administrativa y la zona Minero Industrial.

El ambiente es desértico, con un clima caluroso de sequía moderada y noches frías con precipitación media anual de 320 mm, temperaturas máximas en enero de 32 ºC y mínimas de 1ºC en el mes de julio. Presenta vegetación de Huayquerias (bad land) con comunidades saxícolas diversas de *Larrea cuneifolia* y *Zucagnia punctata*, de *Chuquiraga erinaceae*, de *Gochnata glutinosa*, etc. y raparías en cursos temporarios con *Tessaria absinthioides*, etc. Lugares de estepas arbustivas sobre suelos arenosos con *Senecio pampeanus* alternando con vegetación de médanos con *Larrea nítida* y vegetación saxícola sobre basaltos.

Se han considerado la cobertura del suelo y el uso del mismo, como sinónimos ya que la metodología y la escala de trabajo no permiten diferenciar usos. Estos términos suelen usarse indiferenciadamente, pero apelan a criterios distintos.

Para llevar a cabo el presente trabajo se usó el software libre QGIS y utilizó la plataforma de Google Earth Engine (GEE) (https://earthengine.google.com/).

Con el propósito de identificar cambios en la cobertura/uso del suelo, ocurridos durante los últimos 37 años en el CMFSR y en algunas zonas aledañas, se construyeron dos mapas de cobertura/uso del suelo: uno para el año 2020 y otro para el año 1982. Se calcularon las métricas (superficie) asociadas a cada clase de cobertura/uso del suelo en cada fecha. Se tomó un área un poco mayor a la del complejo (Figura 2), con el propósito de observar revegetalización en zonas donde antes del emprendimiento minero había una actividad ganadera (ovina/caprina) importante para el Municipio de San Rafael, debido a que para la década del 50 había para el sur de Mendoza un proceso de "colonización" respaldado por el gobierno provincial (Hirschegger, 2014). Esta zona cuenta con vertientes de agua permanente como lo es el arroyo El Tigre (Figura 1) además de cursos de agua intermitentes como el arroyo Gendarmería. La producción ganadera era realmente importante comparable a la producción caprina/ovina de la localidad del Nihuil (A. Scotti, comunicación personal)

Se compararon los mapas y las métricas, lo que permitió suponer que la sucesión vegetal condujo a los cambios ocurridos en el CMFSR durante el periodo de 37 años analizado.

Para llegar a esta conclusión se procedió de la siguiente manera:

Se analizó la cobertura/uso del suelo en la actualidad en GEE (tiempo 1), al dar inicio al análisis por el tiempo presente se logran interpretar las coberturas del área de estudio (de la serie Landsat, con una resolución espacial de 30 m) con las imágenes de alta resolución disponibles en GEE. Este primer paso ayuda al análisis de la imagen del pasado. Durante los años 2018 y 2019, se realizaron diferentes trabajos de campo en la zona, lo que ayuda a tener certeza sobre la clasificación de los usos del suelo identificados en las imágenes.

Este análisis consiste en buscar varias imágenes satelitales en una colección determinada, las cuales se filtran al seleccionar escenas que se superpongan con los límites del CMFSR y correspondan al período de tiempo de primavera-verano para ambos momentos. Se utilizó el programa para crear un mosaico a partir de todas las imágenes disponibles (en principio, una cada 16 días en el período de tiempo analizado), aplicando una corrección y luego seleccionando entre los píxeles libres de nubes. Es decir, se creó un único ráster a partir de todas las escenas encontradas en el catálogo que se correspondían con la etapa de primavera-verano de los años 2019 y 2020.

Se visualizaron las imágenes de alta resolución disponibles en GEE detrás del mosaico, y se hizo un reconocimiento de las distintas coberturas de la tierra y los usos del suelo presentes. De esta manera, se pudieron reconocer dos categorías de cobertura/uso del suelo, las cuales son mutuamente excluyentes y exhaustivas (Roca Expuesta o Suelo Desnudo y suelo con Vegetación).

Luego se realizó una clasificación no supervisada del mosaico y cuándo se logró la clasificación anteriormente mencionada este ráster se exportó para luego descargarlo y trabajar con él desde el QGIS.

Se repitieron los pasos para realizar el análisis del tiempo pasado. En este escenario no se dispone de imágenes de alta resolución en GEE para revisar el mosaico o el resultado de la clasificación. Sin embargo, la visualización del tiempo 1 ha servido para la interpretación de las coberturas/usos del suelo en imágenes de la serie Landsat. Entonces se realizó la búsqueda en una colección determinada de imágenes satelitales. Para el periodo 1982-1983 se dispone de imágenes del satélite Landsat 4 TM.

Luego de seguir el mismo procedimiento se cargaron las capas correspondientes a las clasificaciones en el QGIS.

En el QGIS, se le asignó nombre a las categorías clases de cobertura/uso del suelo y se procedió a calcular la superficie asociada a cada clase de cobertura/uso en cada fecha. Para esto se calculó el número de píxeles correspondiente a cada clase. Dado que los mapas se construyeron a partir de clasificaciones de imágenes Landsat y que la resolución espacial de las mismas es de 30 x 30 m, entonces la resolución de cada píxel de la superficie es de 900 m2.

Se finalizó con la construcción de los dos mapas de cobertura/uso del suelo para el CMFSR en las fechas 1982-1983 y 2019-2020 en QGIS.

Este procedimiento se repitió para los mismos periodos de tiempo (1982-1983 y 2019-2020) para un área más reducida que comprende la zona industrial del CMFSR la cual tuvo un impacto directo de las actividades de explotación, extracción y tratamiento del mineral (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la metodología propuesta se obtuvo un ráster diferenciado en dos categorías, que son Roca Expuesta/Suelo Desnudo y Vegetación (Figura 2.). La categoría de Roca Expuesta/Suelo Desnudo incluye también las construcciones civiles. En la categoría de Vegetación está incluido todo tipo de vegetación desde rastrera hasta arbustos y árboles tanto nativos como exóticos, esto debido a que no era posible diferenciar la roca expuesta del suelo desnudo. Así mismo, no se incluyeron más categorías en los tipos de cobertura vegetal. Por ejemplo, si se tienen cuatro categorías como Roca Expuesta, Vegetación Rastrera con Suelo Desnudo, Vegetación Arbustiva y Suelo Desnudo y Escombros, se estaría sobreestimando el Suelo Desnudo y subestimando la Vegetación o viceversa. Esto principalmente porque no se lograba tener mucha precisión debido al tamaño del pixel. Por esta razón se optó por estas categorías generales, que para el objetivo propuesto son suficientes.

Al procesar las imágenes Landsat en el programa GEE los cuerpos de agua fueron identificados o marcados como vegetación, en ambos mapas, lo que llevaba a interpretar que había más cobertura vegetal, por lo que fue necesario restar para la imagen Landsat 8 las áreas de cuerpos de agua de los diques y de los cuerpos de agua relacionados a las canteras La Terraza, Tigre III, EL Gaucho y El Tigre I. Para el mapa ráster generado con la imagen Landsat 4 fue necesario restar las áreas relacionadas únicamente a Tigre III y El Gaucho, ya que para 1982 ya existían, pues su construcción empezó en 1975, y en 1982 se empezaban a explotar las canteras Tigre I y La Terraza. Estas áreas restadas luego fueron sumadas a las categorías de Roca Expuesta/Suelo Desnudo.

En la Tabla I se presentan las áreas (km^2) de las dos categorías de uso del suelo (Roca Expuesta o Suelo Desnudo y Vegetación), para el año entre 1982-1983 y para el año entre 2019-2020 para el CMFSR, asignadas a las imágenes Landsat 4 y Landsat 8, respectivamente. De igual manera, la Tabla II presenta los mismos resultados para el área específica de la zona industrial del complejo.

A partir de la Tabla I, se puede observar que durante el periodo 1982-1983 había más roca expuesta o suelo desnudo (79,5%), debido, posiblemente no sólo a la geología del lugar, ya que los afloramientos rocosos son propios de esta zona, sino también debido a los trabajos de explotación que se estaban llevando a cabo en la mina, desde 1975 año en el que se inician las actividades del CMFSR.

Para la imagen Landsat 8 se logra apreciar en las áreas relacionadas la presencia de vegetación que está cubriendo más área (32,6%) que en la imagen de 1982 (20,2%), esto puede deberse a que desde 1997, ya no hay ninguna actividad de explotación minera en el sitio. Por lo que es factible considerar que los procesos de sucesión vegetal natural han ido colonizando áreas de suelo removido, pasivos ambientales y posiblemente algunos caminos poco transitados.

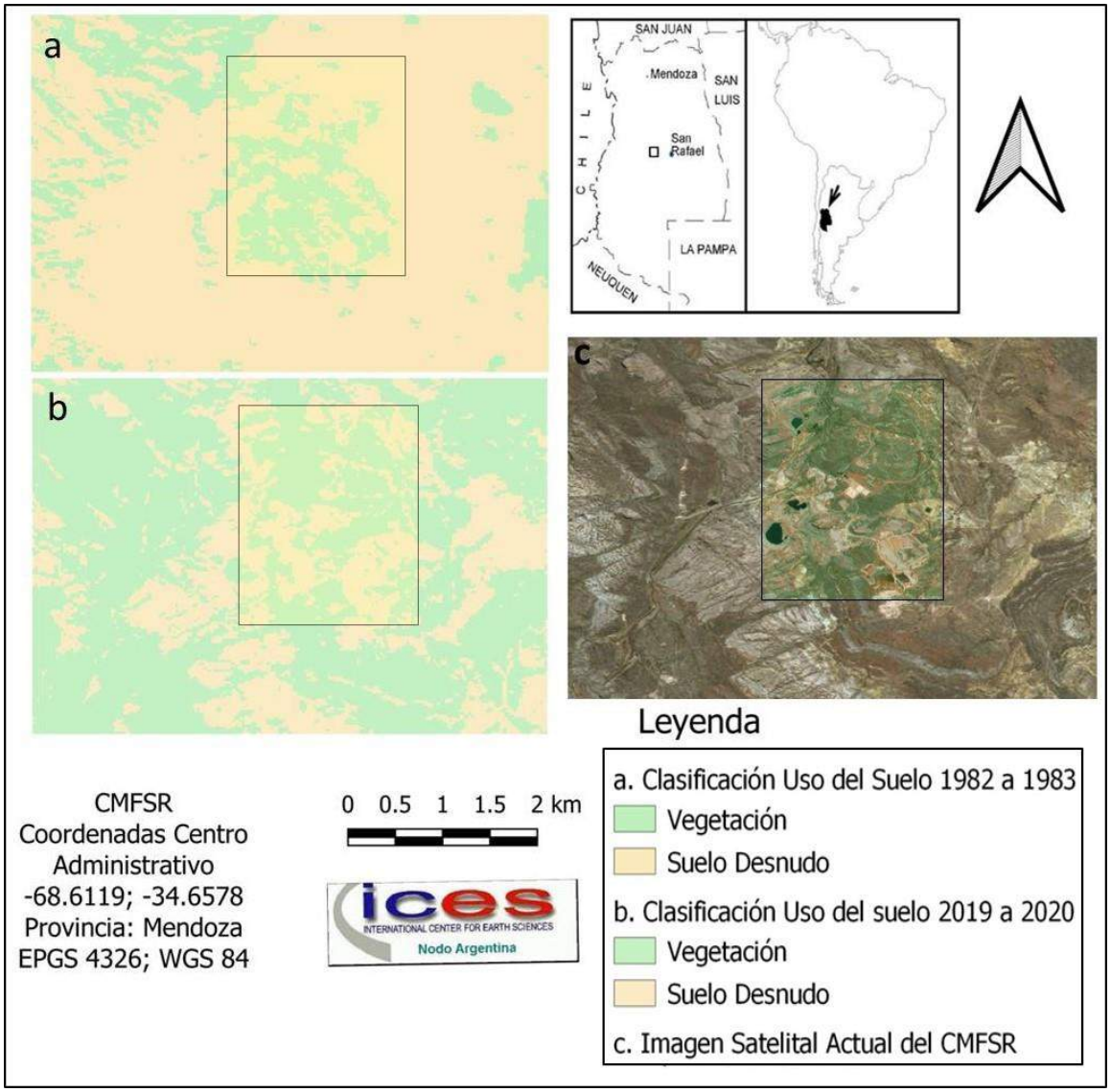


Figura 2. Imágenes con categorías de uso del suelo para la zona del Complejo Minero Fabril de San Rafael, provincia de Mendoza, con recuadro en cada imagen que corresponde a la zona de mayor impacto directo sobre el suelo. **a**. Imagen de categoría del uso del suelo para el periodo 1982 a 1983, **b**. Imagen categoría uso del suelo para el periodo 2019 a 2020 y **c**. Imagen Satelital para el CMFSR en la actualidad.

Estos procesos naturales que benefician la propagación de la vegetación, y su establecimiento en pasivos ambientales, contribuyen a una disminución en la propagación de algunos elementos nocivos como metales pesados al quedar retenidos en la rizosfera, lo que evita su dispersión por el viento o que sean llevados a las napas (Blaylock and Huang 2000).

En cada recuadro marcado en las partes a b y c de la Figura 2 se logra apreciar la zona industrial del complejo. En la parte a, con impacto directo de la actividad minera en el primer periodo de 1982-1983. Luego que el impacto cesó, ha habido un proceso de revegetalización que se observa en el recuadro de la figura 2b para el segundo periodo analizado de 2019-2020. Se aprecia que el área de la zona industrial presenta un proceso de revegetalización natural. En términos proporcionales este proceso de revegetalización es menor al del resto del área mostrada (Figura 2c), esto referido a la zona donde posiblemente hubo actividad ganadera. Esta baja velocidad media de revegetalización puede deberse al impacto directo a gran escala de las actividades mineras donde se suman una serie de problemas ambientales como subsistencia de la tierra, suelo pobre y calidad del agua, alto contenido de metales, contaminación, vegetación limitada, descenso de las aguas subterráneas, peligros geológicos y daños a la infraestructura, factores que son comunes de encontrar en muchas áreas mineras de regiones áridas y semiáridas (Hernández and Pastor 2008; Anawar et al. 2001). Por lo tanto, en términos mecánicos, el impacto fue mayor al que pudo haber realizado la actividad ganadera, aunque las diferencias en las velocidades de restauración no son demasiados grandes ver Figura 3.

Tabla I. Categorías y usos del suelo para dos periodos de tiempo en el CMFSR y sus alrededores, provincia de Mendoza.

Categoría de Uso del Suelo	**Imagen Landsat 4 Año 1982-1983 Áreas km^2**	**% Respecto al Área Total**	**Imagen Landsat 8 Año 2019-2020 Áreas km^2**	**% Respecto al Área Total**
Roca Expuesta o Suelo Desnudo	23,090	79,15	19,599	67,35
Presencia de Vegetación	5,875	20,28	9,456	32,64

La zona industrial remarcada en la Figura 2, corresponde a 23,5% del área total mapeada, donde para el periodo de 1982-1983 se tiene que el 14,4 % corresponde a Roca Expuesta o Suelo Desnudo y el resto (9,1%) es el área cubierta con Vegetación Para el periodo 2019-2020 estas proporciones han cambiado a 10,6% de área con Roca Expuesta o Suelo Desnudo y 12,8% de área cubierta por Vegetación, lo que representa como se puede ver en la Tabla II, una disminución de la Roca Expuesta o Suelo Desnudo debido a los procesos de revegetalización. Una discusión necesaria es notar cómo a pesar de todo lo que implica impactar un ambiente con actividad minera o ganadera, al cese de estos impactos la revegetalización se hace posible, aunque sea a velocidades distintas (ver Figura 3).

En la Figura 3 se puede apreciar la velocidad de revegetalización de las áreas analizadas, referidas al cambio del uso del suelo al disminuir las áreas de Roca Expuesta o Suelo Desnudo y al incremento de las áreas con Vegetación, en los 37 años transcurridos entre los mapas de uso del suelo de las dos imágenes satelitales comparadas.

Las menores pendientes de -3,74 para la Roca Expuesta y 3,73 para la Vegetación se presentan en el cambio del uso del suelo en la Zona Industrial y el Área Restante que posiblemente tuvo un impacto ganadero extensivo en la década de los 50 tiene una pendiente de -8,31 para la Roca Expuesta o Suelo Desnudo y de 8,63 para la Vegetación, esto reafirma lo discutido anteriormente sobre el impacto mecánico en el

suelo de la zona industrial, lo que es probable que disminuya un poco la velocidad de la revegetalización.

Tabla II. Categorías y usos del suelo para dos periodos de tiempo en la zona industrial del CMFSR, provincia de Mendoza.

Categoría de Uso del Suelo	Imagen Landsat 4 Año 1982-1983 Áreas km²	% Respecto al Área Total	Imagen Landsat 8 Año 2019-2020 Áreas km²	%Respecto al Área Total
Roca Expuesta o Suelo Desnudo	4,17	14,40	3,09	10,66
Presencia de Vegetación	2,63	9,10	3,71	12,83

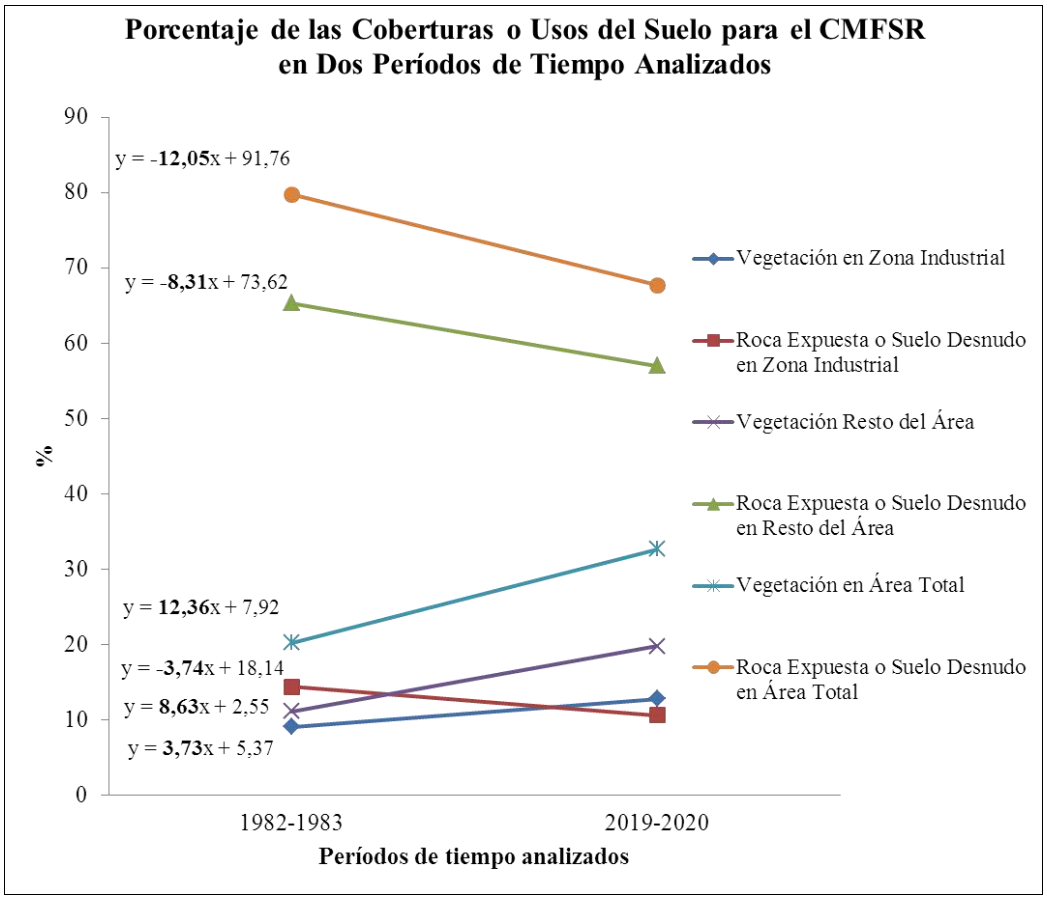


Figura 3. Porcentaje de las coberturas o usos del suelo para el CMFSR en dos períodos de tiempo analizados, se presentan los gráficos para la Zona Industrial, Área Total y el Área Restante, con sus respectivas ecuaciones de las líneas de tendencia.

Las menores pendientes de -3,74 para la Roca Expuesta y 3,73 para la Vegetación se presentan en el cambio del uso del suelo en la Zona Industrial y el Área Restante que posiblemente tuvo un impacto ganadero extensivo en la década de los 50 tiene una pendiente de -8,31 para la Roca Expuesta o Suelo Desnudo y de 8,63 para la Vegetación, esto reafirma lo discutido anteriormente sobre el impacto mecánico en el

suelo de la zona industrial, lo que es probable que disminuya un poco la velocidad de la revegetalización.

Es posible que a partir de 1975 cuando el CMFSR empieza a operar e impactar la roca y el suelo, la actividad ganadera este en un proceso de disminución, por lo que el impacto ganadero ha ido disminuyendo desde 1975 y la actividad minera desde 1997, aunque en el predio y sus alrededores aún es común ver ganado caprino y bobino, seguramente no en las cantidades en que había en los años 50.

CONCLUSIONES

Haciendo uso de SIG para el análisis de imágenes satelitales se evidenciaron cambios en la cobertura vegetal/uso del suelo en el CMFSR desde 1982 al año 2020. Esta primera aproximación fue útil para poder identificar procesos sucesionales ecológicos o procesos de colonización. Sin embargo, es necesario ir al campo y corroborar la presencia o no de vegetación en algunos sitios para de esa manera poder integrar metodologías y evitar errores de sobre estimación y/o subestimación. A pesar de que las imágenes satelitales y los programas de procesamiento de imágenes tienen variadas herramientas que ayudan a minimizar interferencias de imagen es necesario en lo posible corroborar en el campo las clasificaciones del uso del suelo.

La metodología empleada tiene la ventaja de ser rápida y replicable, para caracterizar los usos del suelo de una región determinada y evaluar sus cambios potenciales a lo largo del tiempo.

Se podrían analizar más imágenes en los periodos intermedios para identificar la velocidad de revegetalización del sitio.

Se pudo identificar que el impacto tanto de la actividad ganadera como minera han tenido procesos de sucesión vegetal que ha contribuido a la revegetalización del suelo impactado o desprovisto de vegetación.

REFERENCIAS

Anawar HM, Freitas MC, Canha N, Santa-Regina I (2011) Arsenic, antimony, and other trace element contamination in a mine tailings affected area and uptake by tolerant plant species. Environ Geochem Hlth 33:353–362

Blaylock MJ, Huang JW (2000) Phytoextraction of metals. In: Raskin I, Ensley B (eds) Phytoremediation of toxic metals—using plants to clean up the environment. Wiley–Interscience, New York, pp 53–56

Castaño Gañán A. R., Álvarez G. y García V. 2018. Banco De Semillas, Herramienta Para Evaluar Restauración Ecológica En El CMFSR. Actas del E-ICES 12 ISBN 978-987-1323-61-6

Hernández AJ, Pastor J (2008) Relationship between plant biodiversity and heavy metal bioavailability in grasslands overlying an abandoned mine. Environ Geochem Hlth 30:127–133

Hirschegger, I., 2014. Estado y tierra en Mendoza (Argentina): fundamentos y consensos en torno a la ley de colonización de 1951. HISTORIA 396 ISSN 0719-0719 Nº 2. [257-288]

Kleiman, L.E. 1993. El volcanismo permo-triásico y triásico del Bloque de San Rafael (Provincia de Mendoza): Su potencial uranífero. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 5: 284-293, Mendoza.

Mansilla M.Y., y Dieguez S.R. 2013. Modelamiento geológico mediante *"software"* minero del sector Tigre I. La Terraza: Distrito Uranífero Sierra Pintada, provincia de Mendoza. Revista de la CNEA, Año XIII, Nº 51-52. Pag 21-31.

Margalef, R. 1963. On certain unifying principles in ecology. The American Naturalist 97: 357-374.

Margalef, R. 1968. Perspectives in Ecological Theory, University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

Margalef, R. 1997. Our Biosphere. O. Kinne, editor. Excellence in Ecology Series. Ecology Institute, Oldendorf, Germany.

Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. Science 164: 262-270.

Odum, E.P. 1992. Great ideas in ecology for the 1990. BioScience 42: 542-545

Scotti, A. (comunicación personal, fue miembro activo en el laboratorio de producción caprina de la Municipalidad de San Rafael, en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo).

Wong MW (2003) Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere 50:775–780.

MODELO PARA ACELERAR LA PREDICCIÓN DE FENÓMENOS EN MÉTODOS EVOLUTIVO-POBLACIONALES

Caymes Scutari P.[ab], Bianchini G.[b], Tardivo M. L.[bc] y Méndez Garabetti M. A.[ab]

[a]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*
[b]*Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido (LICPaD). Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Mendoza, ARGENTINA*
[c]*Departamento de Computación, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nac. 36, Km. 601, Córdoba, ARGENTINA*

e-mail: pcaymesscutari@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

La predicción de fenómenos, sean estos ambientales, climatológicos, naturales, etc., constituye un proceso complejo en el que intervienen y se interrelacionan diversas disciplinas, y suele considerarse uno de los ejemplos de aplicación de ciencia computacional por antonomasia. Las ciencias formales proveen ciertos modelos que permiten representar el fenómeno en cuestión, retroalimentados con la información experta y fehaciente que brindan las ciencias experimentales y/o ingenieriles. Por su parte, las ciencias informáticas y de la computación proveen el soporte para implementar tales datos y modelos, sean estos formales, empíricos, o mixtos, y a su vez para su ejecución en pos de la obtención de la predicción deseada. La complejidad de tales sistemas suele requerir tiempos de ejecución prolongados, que en ocasiones dificultan la obtención de resultados en una ventana temporal que resulte de utilidad para la toma de decisiones que permitan evitar situaciones de riesgo y/o alto costo (por ejemplo, pérdida de vidas humanas, destrucción del medio ambiente, pérdidas edilicias o económicas, etc.) o incluso catástrofes. En este trabajo se realiza un análisis relativo a la ganancia o reducción en el tiempo de respuesta de tales sistemas a partir de la incorporación de un modelo de rendimiento para activar el proceso de sintonización automática y dinámica en aplicaciones predictivas. Como objeto de estudio, se considera en particular la familia de métodos evolutivo-poblacionales, los cuales involucran algún tipo de metaheurística que a partir de una muestra o población de datos inicial evoluciona iterativamente a lo largo de sucesivas generaciones modificando la población hasta alcanzar una calidad de predicción aceptable.

Palabras Clave: Toma de decisiones, prevención, predicción, ciencia computacional, sintonización

INTRODUCCIÓN

En las ciencias y en la ingeniería es común encontrarse con la necesidad de resolver problemas relacionados con la predicción de fenómenos o comportamientos, la búsqueda, la planificación, etc. Es por ello que la ciencia computacional se ha vuelto una herramienta indispensable a la hora de implementar modelos y soluciones. Sin embargo, la complejidad de los problemas y los métodos conllevan programas complejos y ejecuciones prolongadas, que no siempre dan como respuesta un resultado útil y acertado. Sobre todo en situaciones de riesgo, como pueden ser las relacionadas

con fenómenos naturales o ambientales, la calidad y el tiempo de la respuesta son factores críticos a tener cuenta, ya que no es deseable reducir el tiempo de respuesta a costa de degradar la calidad del resultado. Es por ello que se hace necesario incluir el proceso de sintonización automática y dinámica en los programas y las aplicaciones, a fin de supervisar la ejecución y mejorar aquellos parámetros que permitan ganar tiempo y calidad. Que la sintonización sea dinámica, significa que esa tarea de supervisión y ajuste se lleva a cabo durante la ejecución del programa, adaptándolo a las condiciones del ambiente de ejecución y a los datos actuales del problema. La sintonización dinámica consta de cuatro etapas (Caymes-Scutari et al, 2016; Naono et al, 2010). En la etapa de **instrumentación** se incluyen directivas en el código fuente para registrar ciertas métricas de interés, necesarias para evaluar el comportamiento de la aplicación de acuerdo al tipo de conocimiento específico que se considere en relación a la misma. En la etapa de **monitorización** se registran en tiempo de ejecución dichas métricas, las cuales son procesadas en la etapa de **análisis** y, en base este conocimiento específico, se definen acciones de sintonización necesarias para mejorar el rendimiento. Posteriormente, en la etapa de **sintonización** se aplican, en tiempo de ejecución, las acciones definidas tendientes a mejorar los aspectos críticos. Que la sintonización sea automática, significa que es transparente al usuario, es decir que todas las etapas se llevan a cabo de forma autónoma y sin intervención del usuario (Caymes-Scutari et al, 2016). En este trabajo, el proceso de sintonización se introduce como un elemento crucial para mejorar el desempeño de algoritmos evolutivo-poblacionales.

En las siguientes secciones se resumen los aspectos más relevantes relacionados con los algoritmos evolutivo-poblacionales, haciendo foco en dos típicos problemas inherentes a su funcionamiento y que afectan a su rendimiento: convergencia prematura y estancamiento. Finalmente, proponemos un conjunto de expresiones y condiciones que permiten modelar tales problemas y detectarlos de forma anticipada. El uso de dicho modelo como fuente de conocimiento experto para incorporar el proceso de sintonización en los programas evolutivo-computacionales, representa una posibilidad muy importante tanto para mejorar la calidad de los resultados como para mejorar los tiempos de respuesta.

ALGORITMOS EVOLUTIVO-POBLACIONALES

En las ciencias y en la ingeniería existen diversos problemas de difícil o compleja resolución que involucran acciones de búsqueda, maximización o minimización, modelización, estimación del comportamiento de un sistema de la naturaleza, predicción de un fenómeno natural, encontrar la secuencia óptima en cadenas de producción, hallar el plan mínimo de costo en procesos de distribución, o determinar el camino más corto entre varios puntos a recorrer, entre otros ejemplos. Existe una amplia taxonomía de algoritmos que permiten abordar la resolución de tales problemas desde diferentes puntos de vista. Dicha taxonomía puede dividirse en dos grandes grupos: métodos exactos y métodos metaheurísticos (Talbi, 2009). Los métodos exactos se caracterizan por brindar la solución exacta del problema, a costo de presentar en general ejecuciones muy prolongadas, ineficientes, y muchas veces difíciles o imposibles de aplicar. Los métodos metaheurísticos, por su parte, son estrategias inteligentes y probabilísticos para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos generales con un alto rendimiento. Un procedimiento se dice heurístico si para él se tiene un alto grado de confianza en que es capaz de encontrar soluciones de alta calidad con un coste computacional razonable,

aunque no se garantice que sea óptimo. Es por ello que las metaheurísticas son consideradas una familia de algoritmos aproximados de propósito general, guiando y combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente una heurística en el espacio de búsqueda. La utilización de metaheurísticas cobra especial interés cuando no hay un método exacto de resolución (o resulta ineficiente por la cantidad de tiempo de cálculo y memoria que requiere), o cuando no es necesario hallar la solución óptima y es suficiente con encontrar una de buena calidad (Talbi, 2009). Para obtener buenas soluciones, cualquier metaheurística debe establecer un balance adecuado entre dos características contrapuestas del proceso: la **intensificación**, constituida por la cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda sobre el dominio considerado, y la **diversificación**, constituida por el esfuerzo empleado en la búsqueda en regiones distantes del espacio; ambos conceptos se corresponden respectivamente con las antes mencionadas explotación y exploración del espacio de búsqueda. El equilibrio entre intensificación y diversificación es necesario para identificar rápidamente regiones del espacio con soluciones de buena calidad, y descartar aquellas regiones no prometedoras o ya exploradas. Alcanzar dicho equilibrio constituye un desafío para el que se aplican distintas estrategias según el tipo de metahurística que se trate. En este proyecto, nos centramos en metaheurísticas evolutivas poblacionales. Que sean evolutivas, significa que su funcionamiento está inspirado en el concepto de evolución darwiniana basada en que, en un entorno dado, serán capaces de sobrevivir aquellos que mejor adaptación o aptitud presenten. Que sean poblacionales, significa que el proceso de búsqueda no considera una única solución candidata, sino que contempla un grupo o muestra de ellas del espacio de búsqueda, las cuales evolucionan en conjunto interactuando entre sí. Es posible representar dicha metáfora, trazándose una relación directa entre elementos de la teoría de la evolución, elementos para la resolución de problemas, y elementos de la computación evolutivo-poblacional (ver Fig. 1).

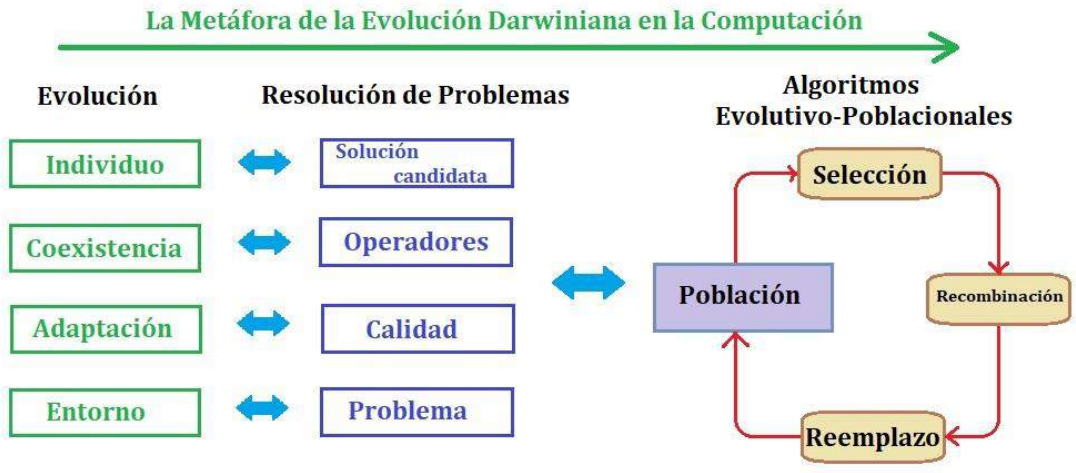


Figura 1. Metáfora Darwiniana: de la naturaleza, a la resolución de problemas mediante algoritmos evolutivo-poblacionales

Así es que lo que en la naturaleza se considera un **individuo** con sus características y con cierta adaptación al entorno, se abstrae como una posible solución o **solución candidata** que será mejor o peor valorada en función de sus características o parámetros y su calidad ante las necesidades y restricciones del problema a resolver. Tal como sucede en la naturaleza, los individuos coexisten y se interrelacionan, dando como descendencia nuevos individuos que combinan las características de sus ancestros, y así se asegura la supervivencia de la especie. Este agrupamiento de individuos es lo que se conoce como **población**, y algorítmicamente constituye una muestra del espacio de búsqueda sobre el que se aplicarán los distintos operadores de **selección**, **recombinación** y **reemplazo** para constituir una nueva **generación** de individuos descendientes. Uno de los aspectos centrales para propiciar que las características que proporcionan una mejor adaptación al problema perduren y se transmitan a lo largo de las generaciones, lo constituye **la función de aptitud**, la cual cuantifica el nivel de adaptación o satisfacción que presenta cada individuo ante el problema. En términos algorítmicos, la búsqueda de la solución se lleva a cabo a lo largo de sucesivos pasos, iteraciones, o generaciones en las que se aplica este esquema sucesivas veces, teniendo como consecuencia la evolución de la población y su convergencia a una solución aceptable. El algoritmo finaliza al verificarse un **criterio de terminación**, que usualmente tiene en cuenta la calidad de las soluciones alcanzadas o el tiempo de ejecución. Los algoritmos evolutivo-poblacionales se caracterizan por presentar una buena actuación a un costo aceptable para una amplia gama de problemas, y por presentar características intrínsecamente paralelas. Los distintos tipos de algoritmos evolutivos-poblacionales se diferencian principalmente por el tipo y cantidad de operadores de recombinación que utilizan, la forma en la que cada uno de ellos funciona, y la porción de la población que se ve afectada en cada generación. En este trabajo, nos centramos en Algoritmos Evolutivos (AE) (Talbi, 2009) y en Evolución Diferencial (ED) (Price et al, 2005; Talbi, 2009). Ambos algoritmos suelen involucrar básicamente los operadores de cruzamiento y mutación, además de la selección y el reemplazo. El cruzamiento opera recombinando la información (valores de parámetros) de dos o más individuos para dar como resultado su descendencia. En los AEs, el cruzamiento se realiza usualmente por parejas, con cierta probabilidad y considerando puntos de corte que definan los segmentos de información que han de intercambiarse entre los dos individuos, mientras que la mutación es una operación unaria, que con cierta probabilidad perturba o modifica algún o algunos parámetros de algunos individuos de la población. Por su parte, en ED la aplicación de los operadores se basa en la distancia euclidiana entre los individuos considerados en el espacio de búsqueda, y son todos los individuos de la población quienes se someten a la aplicación de los mismos.

ESTANCAMIENTO Y CONVERGENCIA PREMATURA

Las metaheurísticas poblacionales tienen diferentes velocidades de convergencia, es decir que la cantidad de generaciones que deben evolucionar, y en consecuencia el tiempo computacional que debe transcurrir para aproximarse a la solución óptima es directamente dependiente del funcionamiento de cada algoritmo y a sus características inherentes. Cuando la metaheurística converge demasiado rápido puede suceder que se alcance un óptimo local. Si el algoritmo no posee mecanismos para prevenir o evitar esta situación puede quedar imposibilitado de escapar de dicha situación. Este fenómeno se conoce como convergencia prematura y está asociada a la pérdida de diversidad de la

población. Por su parte, existe otro fenómeno denominado estancamiento, situación en la cual el optimizador es incapaz de encontrar soluciones mejores que las anteriores, aún cuando los individuos de la población sean diversos, es decir aún cuando la población no haya convergido a un óptimo (Talbi, 2009; Lampinen y Zelinka, 2000).
Como se mencionó en la sección anterior, en ED todos los individuos participan en el proceso de mutación y cruzamiento, por lo que en cada generación se recorre la población completa y cada individuo es mutado y cruzado con otros individuos de la generación corriente. Esta forma de operación difiere de la utilizada por los AEs, en los que la proporción de individuos de la población que participan en el proceso de mutación y cruzamiento está determinada por un parámetro definido por el usuario. En general, un valor para este parámetro inferior al 50% de los individuos totales es una configuración para la cual se ha observado una cantidad creciente o sostenida en cuanto a la calidad de las soluciones. Esta característica constituye una marcada diferencia entre ambas metaheurísticas. Es por ello, que cada metaheurística presenta características particulares inherentes a su modo de funcionamiento que impacta de formas diferentes en la calidad de los resultados alcanzados. Teniendo en cuenta estas diferencias, hemos analizado el comportamiento y distribución de la aptitud de los individuos de la población a lo largo de la evolución, tanto para AEs como para ED a fin de caracterizar el funcionamiento de cada uno, detectar los problemas que se manifiestan, y modelarlos para poder mitigarlos.
En la siguiente sección presentamos un modelo propuesto para prevenir situaciones de estancamiento y convergencia prematura, con el principal fin de acelerar el tiempo de respuesta de cada algoritmo. Este resultado podrá extenderse a toda aplicación práctica que se haga de dichos algoritmos en la resolución de los diversos problemas de la ciencia y la ingeniería.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para estudiar la convergencia y el estancamiento en EAs y ED, hemos considerado un programa iterativo. Como a lo largo de la evolución el programa debe calibrar periódicamente sus resultados parciales, el procesamiento se organiza a lo largo de cierta cantidad de pasos. Para cada paso, se establece como condición de finalización 15 generaciones. Se definió una población de 200 individuos (ver Fig. 2 y Fig. 3).

Para analizar la distribución de la población hemos utilizado gráficos de caja o *boxplots*, con la distribución de los valores de aptitud de cada uno de los 200 individuos de la población. En cada figura (ver Fig. 2 y Fig. 3) se muestran tres gráficos correspondientes al segundo, al cuarto, y al sexto paso de procesamiento. A su vez, para cada uno de los pasos se presentan tres *boxplots* que representan la distribución de la población cada 5 iteraciones.

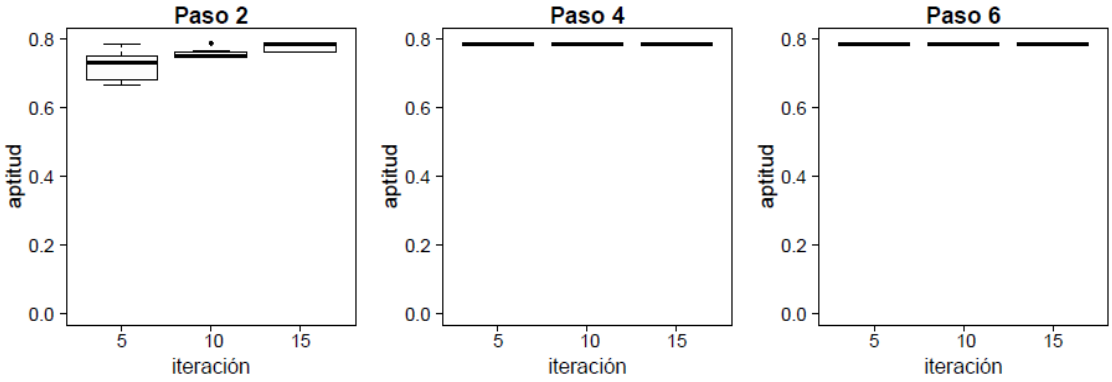


Figura 2 Distribución de la aptitud poblacional en Evolución Diferencial (ejemplo).

En el caso del Evolución Diferencial (ver Fig. 2) puede apreciarse claramente que al terminar las primeras cinco iteraciones la población ya posee baja distribución, y si bien esto provoca que ED alcance rápidamente su máxima capacidad de exploración, en los pasos sucesivos se observa que ED no será capaz de aportar mejoras significativas. Para el mismo paso, también se observa que al finalizar el paso 2 la población ya alcanza valores cercanos a 0.8 en su totalidad y es una situación que a lo largo de los pasos 4 y 6 se profundiza y se mantiene.

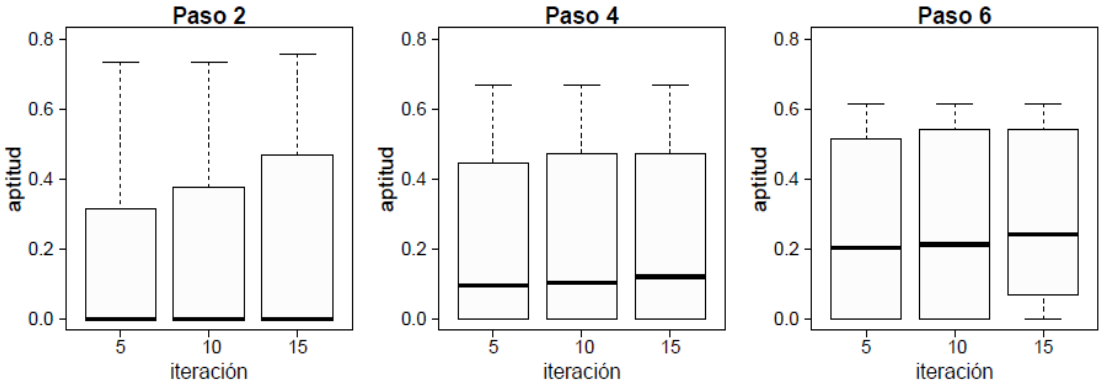


Figura 3. Distribución de la aptitud poblacional en un Algoritmo Evolutivo (ejemplo).

En el caso del Algoritmo Evolutivo (ver Fig. 3) en el segundo paso la población inicia con valores cercanos a cero (la mediana está próxima a cero). A medida que la población evoluciona por las diferentes generaciones, la distribución se modifica levemente hacia valores superiores. Se puede observar que en la décimo quinta iteración del paso 6 la mediana alcanza un valor cercano a 0.2 y el *boxplot* llega a un valor máximo de 0.6 (ver bigote superior).

Estos experimentos ponen de manifiesto que ambos algoritmos poseen diferentes velocidades de convergencia: mientras que ED alcanza soluciones de buena calidad en pocas iteraciones, el AE va mejorando la calidad global de la población de forma más paulatina. Por lo tanto dicha distinción debe ser contemplada y parametrizada en el

modelo que se desea definir. Por otro lado, es importante notar la importancia de detectar situaciones como la de ED, ya que ejecutar los tres pasos se traduce en un esfuerzo computacional en vano, puesto que se continúa ejecutando el proceso evolutivo sin posibilidades de mejorar individuos. Dicho de otra forma, en virtud de los resultados obtenidos en el segundo paso de ED, la ejecución de los pasos 4 y 6 podrían ahorrarse y así mejorar la eficiencia en el uso de los recursos computacionales.

A continuación se proponen conjunto de expresiones y condiciones para modelar y detectar un estado de convergencia prematura o estancamiento en un algoritmo poblacional:

Los parámetros del modelo deben definirse de acuerdo a la naturaleza del algoritmo en cuestión. Dichos parámetros son:

- ***UmbralDelta***: Establece cuál es la diferencia mínima que debe considerarse entre la distribución corriente y la distribución mínima obtenida históricamente, para detectar un estado de estancamiento o convergencia prematura. Su valor puede establecerse *a priori* empíricamente.
- ***UmbralME:*** establece cuál es el umbral o valor mínimo de mejoras o movimientos efectivos de la metaheurísticas requeridas en una generación para descartar la existencia de estancamiento o convergencia prematura.
- ***PorcReinic***: establece la porción de la población que se desea reinicializar al detectar un estado de estancamiento. Se propone considerar sólo una porción, a fin de conservar parte de las buenas características aprendidas o heredadas a lo largo de las generaciones previas.
- ***CritReinic***: establece qué criterio de selección o reemplazo ha de tenerse en cuenta a la hora de reinicializar la *PorcReinic* de la población.

La información que debe capturarse durante la ejecución para poder evaluar el modelo a lo largo de las sucesivas generaciones requiere de:

- **Aptitud** de cada individuo de la población: es necesaria para determinar la distribución de la población, y en función de ello calcular *CurrIQR* y *MinIQR*
- **Tamaño de la Población**: es necesario para ponderar la distribución de las aptitudes.
- **Cantidad de individuos que mejoran la aptitud de sus progenitores**: necesaria para conocer cuántos movimientos efectivos se están produciendo como para justificar la continuidad de la ejecución.

Los parámetros que el modelo debe actualizar en cada generación evolutiva son:

- ***CurrIQR***: representa el IQR o rango intercuartil (Healey, 2007) de la iteración o generación corriente, y cuantifica la dispersión de la población, es decir, la variabilidad de la distribución de la población.

Se calcula teniendo en cuenta la aptitud de todos los individuos de la población

- ***MinIQR***: almacena el mínimo IQR alcanzado hasta el momento.
- ***Delta***: se calcula como *MinIQR-CurrIQR*, y representa una forma de medir la similitud entre la dispersión de la población corriente con las predecesoras.
- ***ME***: cuantifica el porcentaje de individuos que luego de un ciclo evolutivo han sido mejorados (mejor valor de aptitud que el de su predecesor).

La expresión que debe evaluarse para tomar decisiones es:

- $0 \leq Delta \wedge Delta \leq UmbralDelta \wedge ME \leq UmbralME$
- La expresión verifica la tendencia decreciente al estancamiento de los valores de dispersión de la población. Debe evaluarse en cada iteración o generación.

Como resultado de la evaluación de la condición anterior, las acciones a realizar son las siguientes:

- **Caso Falso**: Continuar el proceso evolutivo normalmente.
- **Caso Verdadero**: (1) Pausar la ejecución. (2) De acuerdo al parámetro *CritReinic* y al parámetro *PorcReinic*, decidir respectivamente cuáles y cuántos individuos de la población deben reinicializarse, y reinicializarlos en consecuencia. (3) Reanudar la ejecución.

Nuestra propuesta consiste en utilizar este modelo como fuente de conocimiento experto en la incorporación de capacidades para la sintonización automática y dinámica de aplicaciones basadas en algoritmos evolutivo-poblacionales, y nuestro interés particular radica de momento en aplicaciones predictivas. El primer caso de aplicación que se consideró corresponde a un algoritmo basado en ED. Los resultados preliminares obtenidos son muy prometedores, y demuestran una reducción considerablemente el tiempo total de ejecución a la vez que se mejoró la calidad de los (Tardivo et al, 2017). Actualmente, está bajo estudio la aplicación del modelo propuesto para la sintonización de programas basados en Algoritmos Evolutivos, teniendo en cuenta por supuesto los parámetros de control acordes a las características de dicho algoritmo.

CONCLUSIONES

Los algoritmos evolutivo-poblacionales permiten resolver problemas complejos de forma aproximada, dando como respuesta resultados de suficiente calidad como para que sean aceptables. Sin embargo, alcanzar esa calidad aceptable podría demandar un esfuerzo computacional muy grande, traducido en un tiempo de respuesta considerable para el usuario final. Más aún, en ocasiones los mencionados algoritmos sufren de estancamiento o convergencia prematura, con lo que ese extenso tiempo de procesamiento no se justifica ni se refleja en la provisión de una respuesta más acertada. Según el problema de que se trate, obtener un resultado con cierta precisión en un

tiempo razonable constituye un aspecto crítico, por ejemplo para salvar vidas o evitar un desastre. Es por ello que en este proyecto proponemos un modelo para la detección anticipada de esos estados de estancamiento a fin de activar acciones de sintonización para mejorar la calidad de los resultados, el tiempo de respuesta, y la eficiencia con la que se utilizan la energía y los recursos computacionales.

REFERENCIAS

Caymes-Scutari, P., Bianchini, G., Sikora, A., Margalef, T., (2016) "Environment for Automatic Development and Tuning of Parallel Applications" HPCS 2016, International Workshop on Parallel Optimization using/for Multi and Many-core High Performance Computing, Innsbruck, Austria. pp. 743-750. IEEE.

Healey, J. F. (2007) *The Essentials of Statistics: A Tool for Social Research*, Thomson/Wadsworth.

Lampinen, J. y Zelinka, I. (2000), "On the Stagnation of the Differential Evolution algorithm", *I.C. Soft Computing*, pp. 76-83.

Naono, K., Teranishi, K., Cavazos, J. y Suda, R. (2010) *Software Automatic Tuning: From Concepts to State-of-the-Art Results*, Springer, New York.

Price K., Storn R., Lampinen J. (2005) *Differential Evolution - A practical approach to global optimization*. Springer-Verlag New York, Inc.

Talbi, E. (2009) *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey

Tardivo, M.L., Caymes-Scutari, P., Méndez-Garabetti, M. y Bianchini, G. (2017) "Optimization for an Uncertainty Reduction Method Applied to Forest Fires Spread Prediction", Computer Science – Cacic 2017, pp. 13-23. Springer.

ESTUDIO DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA CIUDAD DE FORMOSA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

Checozzi F. [ab] , Boggio N.[abc] y Vorobioff J. [ab]

[a]*Departamento de Micro y Nanotecnología, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA*
[b]*Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[c]*CONICET, ARGENTINA*

e-mail: vorobioff@cnea.gov.ar

RESUMEN

La provincia de Formosa tiene una ecodiversidad amplia, que se ve muy afectada por el cambio climático, la deforestación y la contaminación causada por el ser humano. En este trabajo se estudian las variaciones de agua superficial en la zona noreste Argentina, en la ciudad de Formosa y alrededores. Mediante software realizado en la plataforma Google Earth Engine, se accede a datos satelitales de agua superficial global. Se estudia la ocurrencia de agua y estadísticas relacionadas para observar los cambios hídricos de la región, y se clasifican diferentes zonas según el tipo de transiciones presentaron desde 1984 hasta el año 2015. Se plantean diferentes enfoques para analizar una región de interés, y en particular se visualizan cambios de estacionalidad debido a la deforestación. La región de análisis se puede modificar fácilmente para estudiar otras zonas de interés.

Palabras Clave: Imágenes satelitales, Agua superficial, Ríos

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad de la provincia de Formosa se vio afectada por actividades como la deforestación (para durmientes, tanino y aserraderos), la expansión agropecuaria con la introducción del ganado bovino, equino y caprino (sobrepastoreo), el monocultivo algodonero en la zona centro, y la caza y captura comercial de la fauna silvestre. El cambio climático genera repercusiones medioambientales. A su vez el río Pilcomayo está siendo contaminado por la actividad minera en Bolivia (Gorleri, 2018).
Una consecuencia conocida de la deforestación es la desestabilización de los ciclos de agua, debido al rol moderador que cumplen los bosques y selvas (ya sea absorbiendo o transpirando agua). La estación seca se prolonga mientras que a su vez aumenta la cantidad de inundaciones (Ellison et al, 2017).
Debido al desmonte de terrenos muchas especies se ven afectadas. Se tienen diferentes zonas con distintas humedades, por tal motivo se registran diferencias en la fauna y en la vegetación.
La provincia de Formosa cuenta con distintos recursos hídricos, la inclinación del terreno afecta el cauce de los ríos Pilcomayo, Bermejo y muchos arroyos que corren en paralelo a estos ríos. El río Pilcomayo proviene de los deshielos de Bolivia. El río Bermejo nace en el oeste de Argentina. Ambos ríos son afluentes del río Paraguay, que

en su paso por territorio argentino presenta un ancho caudal que permite la navegación de buques (Gavilan et al, 2019).
El clima provincial es tropical. En el este las lluvias son uniformes durante todo el año, llegando a orillas del río Paraguay a superar los 1200 mm anuales. El clima de Formosa se puede dividir en subtropical sin estación seca en su sector oriental, y en subtropical con invierno seco en su sección occidental. En el verano las temperaturas ascienden a más de 44 °C en todo el territorio, mientras que en el invierno, a veces se registran temperaturas de 6 °C por acción del viento pampero. El viento norte sopla fuertemente a partir de fines de agosto hasta principios de abril; es un viento cálido y húmedo, y afecta a la población provocando cambios en el estado de ánimo (Mendoza M., 2003).
En este trabajo se estudia la ciudad de Formosa y sus alrededores. Resulta importante estudiar las propiedades del agua superficial en el noreste de Argentina para cuantificar los efectos ambientales causados por el ser humano. Para tal fin, se desarrollaron programas en JavaScript para la plataforma Google Earth Engine. Estos programas se pueden modificar fácilmente para estudiar diferentes regiones del país.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se estudian las variaciones de agua superficial en la zona noreste Argentina, en la ciudad de Formosa y alrededores. Mediante software realizado en la plataforma Google Earth Engine, se accede a los datos satelitales GSW (Global Surface Water). Se estudia la intensidad en los cambios correspondiente a la detección del agua y se clasifican regiones según sus variaciones desde 1984 hasta el año 2015. Se selecciona una región de interés y se plantean diferentes enfoques para detectar ocurrencias de agua y cambios temporales entre dos períodos. También se clasifican regiones siguiendo estos enfoques (Pekel et al, 2016).

Ocurrencia de agua

La ocurrencia del agua muestra dónde hubo agua superficial entre 1984 y 2015 y proporciona información sobre la dinámica general del agua. Esta estadística captura la variabilidad y los cambios intra e interanuales (Fassoni-Andrade et al, 2020).
La ocurrencia se obtiene mes a mes mediante la proporción entre detecciones de agua y el total de observaciones válidas, y promediando las ocurrencias mensuales. Esto permite normalizar por variaciones distribucionales causadas por agua estacional que serían ocultadas con un promediado directo en un período largo de tiempo, ver Ec. (1).

$$Ocurrencia_{mes} = \frac{\sum_{mes} Detecciones\ de\ agua}{\sum_{mes} Observaciones\ válidas}; Ocurrencia = \overline{Ocurrencia_{mes}} \quad (1)$$

Se detectó la presencia de agua y se graficó su ocurrencia sobre un mapa de la región mediante la ejecución del siguiente código en el Earth Engine:

```
var gsw = ee.Image('JRC/GSW1_0/GlobalSurfaceWater');

var occurrence = gsw.select('occurrence');

```

-Primero se carga la imagen con información sobre el agua superficial del mundo y se selecciona la banda de ocurrencia, la cual es un valor porcentual.

```
var VIS_OCCURRENCE = {
    min: 0,
    max: 100,
    palette: ['red', 'blue']
};

Map.addLayer({
  eeObject: occurrence.updateMask(occurrence.divide(100)),
  name: "Water Occurrence (1984-2015)",
  visParams: VIS_OCCURRENCE
});

Map.setCenter(-58.00847805175783, -26.116757478164978, 10);
```

Por último se añade una capa de ocurrencia al mapa generado por el Earth Engine, con una paleta de colores que varía gradualmente entre el rojo y azul, y se centró el mapa en la ciudad de Formosa, ver Fig. 1.



Figura 1. Ocurrencia de agua entre 1984 y 2015. Rojo (mínimo), azul (máximo)

Cambios de intensidad en la ocurrencia de agua

Posteriormente se estudia una medida de cómo ha cambiado el agua superficial entre dos épocas: 1984-1999 (época 1) y 2000-2015 (época 2). La capa de datos del satélite: "Cambios de Intensidad" proporciona una medida de cómo ha cambiado el agua superficial entre las épocas mencionadas. La capa representa el cambio en la ocurrencia a través del promedio de la diferencia de ocurrencias entre pares homólogos de meses tomados de las dos épocas, ver Ec. (2) y (3).

$$Cambio\ ocurrencia_{mes\ n} = Ocurrencia_{mes\ n\ época\ 1} - Ocurrencia_{mes\ n\ época\ 2} \quad (2)$$

$$Cambio\ de\ intensidad\ de\ ocurrencia = \overline{Cambio\ de\ ocurrencia_{mes\ n}} \quad (3)$$

En el código de Earth Engine se añadió una capa de cambio de intensidad de ocurrencia de forma similar a la que se agregó la capa de ocurrencia:

```
var gsw = ee.Image('JRC/GSW1_0/GlobalSurfaceWater');

var change = gsw.select("change_abs");

var VIS_CHANGE = {
    min: -50,
    max: 50,
    palette: ['red', 'black', 'limegreen']
};

Map.addLayer({
  eeObject: change,
  visParams: VIS_CHANGE,
  name: 'occurrence change intensity'
});

Map.setCenter(-58.00847805175783, -26.116757478164978, 10);

```

Se seleccionó la banda de cambio de intensidad absoluto perteneciente a la información de agua superficial global, con una paleta que varía gradualmente de rojo a negro y de negro a verde para valores entre -50 y 50, y se centró el mapa como en el script de la sección anterior, ver Fig, 2.

```
var roi = ee.Geometry.Polygon(
        [[[-58.252237207031264,-26.2594757826322  ],
          [-58.13001430664064 ,-26.303803721400136],
          [-58.065469628906264,-26.14241806332914 ],
          [-58.18219936523439 ,-26.10419483680904 ]]]
);

var histogram = ui.Chart.image.histogram({
  image: change,
  region: roi,
  scale: 30,
  minBucketWidth: 1
});
histogram.setOptions({
  title: 'Histogram of surface water change intensity.'
});
print(histogram);
```

A su vez, mediante un histograma se resumen los cambios para una región poligonal de interés (roi) específica de 240 Km^2 (como se ve en la Fig. 2), ver Fig. 3.

Análisis mediante la capa satelital de Transición de agua

Mediante la capa de transición de agua se distinguen distintas clases de zonas según su ocurrencia (sin presencia de agua, agua estacional, agua permanente) o si hay agua de forma efímera (agua efímera permanente y efímera estacional). A modo de resumen se observa una disminución en los niveles de agua en la segunda época. También se observa un 34 % de zonas con agua detectada. De las cuales 31,6 % corresponde a agua permanente, 47,4 % a agua efímera estacional y el resto para las otras clases.

Con Earth Engine se agrega una capa al mapa y se lo centró en la ciudad para visualizar la transición del agua:

```
1.  var gsw = ee.Image('JRC/GSW1_0/GlobalSurfaceWater');
2.
3.  var transition = gsw.select('transition');
4.
5.  Map.addLayer({
6.    eeObject: transition,
7.    name: 'Transition classes (1984-2015)'
8.  });
9.
10. Map.setCenter(-58.00847805175783, -26.116757478164978, 10);
11.
```

Se selecciona la banda con información de transición y se crea un gráfico de forma similar a las secciones anteriores para visualizar las diferentes clases (Agua estacional, efímera permanente, etc.), ver Fig. 4.

Luego se calcula el área correspondiente a cada clase y se crea un gráfico torta para visualizar más cómodamente la información, para ello:

```
12. var area_image_with_transition_class = ee.Image.pixelArea().addBands(transitio
    n);
```

-Se crea una imagen con dos bandas: clase de transición y área real de cada píxel en metros cuadrados.

```
13. var roi = ee.Geometry.Polygon(
14.         [[[-58.252237207031264,-26.2594757826322  ],
15.           [-58.13001430664064 ,-26.303803721400136],
16.           [-58.065469628906264,-26.14241806332914 ],
17.           [-58.18219936523439 ,-26.10419483680904 ]]]
18. );
19.
20. var reduction_results = area_image_with_transition_class.reduceRegion({
21.   reducer: ee.Reducer.sum().group({
22.     groupField: 1,
23.     groupName: 'transition_class_value',
24.   }),
25.   geometry: roi,
26.   scale: 30,
27.   bestEffort: true,
28. });
29.
30. var roi_stats = ee.List(reduction_results.get('groups'));
31.
```

Se aplica un reductor sobre una región de interés que calcula el área por clase sumando todas las áreas de los píxeles pertenecientes a una clase, y se guarda los resultados en una lista.

```
var lookup_names = ee.Dictionary.fromLists(
    ee.List(gsw.get('transition_class_values')).map(ee.String),
    gsw.get('transition_class_names')
);

var lookup_palette = ee.Dictionary.fromLists(
    ee.List(gsw.get('transition_class_values')).map(ee.String),
    gsw.get('transition_class_palette')
);

function createFeature(transition_class_stats) {
  transition_class_stats = ee.Dictionary(transition_class_stats);
  var class_number = transition_class_stats.get('transition_class_value');
  var result = {
      transition_class_number: class_number,
      transition_class_name: lookup_names.get(class_number),
      transition_class_palette: lookup_palette.get(class_number),
      area_m2: transition_class_stats.get('sum')
  };
  return ee.Feature(null, result);
}

var transition_fc = ee.FeatureCollection(roi_stats.map(createFeature));

```

-Se crea una colección de características de cada clase: número de clase, nombre de clase, color (extraídos de la imagen de agua superficial global) y el área calculada anteriormente.

```
function createPieChartSliceDictionary(fc) {
  return ee.List(fc.aggregate_array("transition_class_palette"))
    .map(function(p) { return {'color': p}; }).getInfo();
}

var transition_summary_chart = ui.Chart.feature.byFeature({
    features: transition_fc,
    xProperty: 'transition_class_name',
    yProperties: ['area_m2', 'transition_class_number']
  })
  .setChartType('PieChart')
  .setOptions({
    title: 'Summary of transition class areas',
    slices: createPieChartSliceDictionary(transition_fc),
    sliceVisibilityThreshold: 0  // Don't group small slices.
  });
print(transition_summary_chart);

```

Y por último se crea el gráfico de torta, el cual requiere la colección de características obtenida previamente y una lista de colores, ver Fig. 5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 2 se muestran los cambios de intensidad en la ocurrencia de agua para una región poligonal de interés (roi) específica de 240 Km^2. Mediante un histograma se resumen los cambios de intensidad para la región de interés, ver Fig. 3.

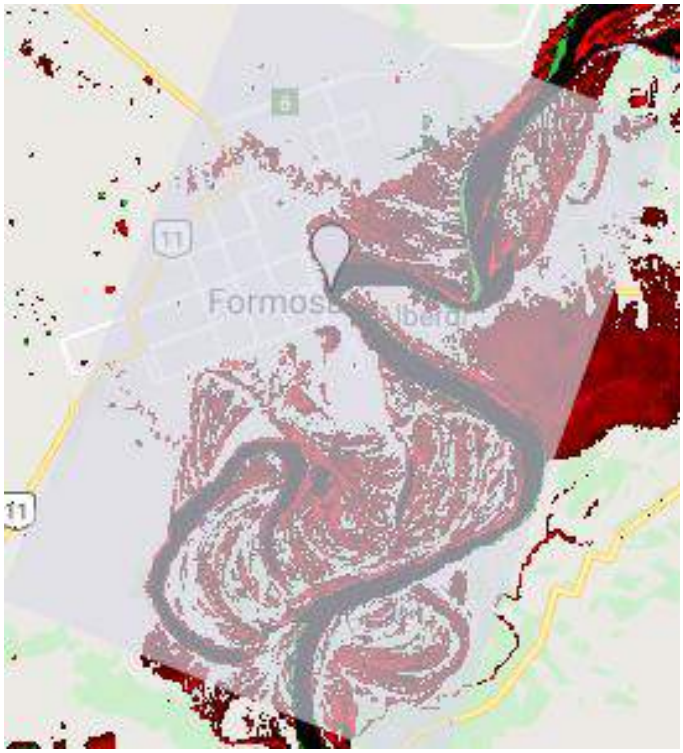


Figura 2. Cambios de intensidad en la ocurrencia de agua. Rojo (mínimo), negro (medio), verde lima (máximo)

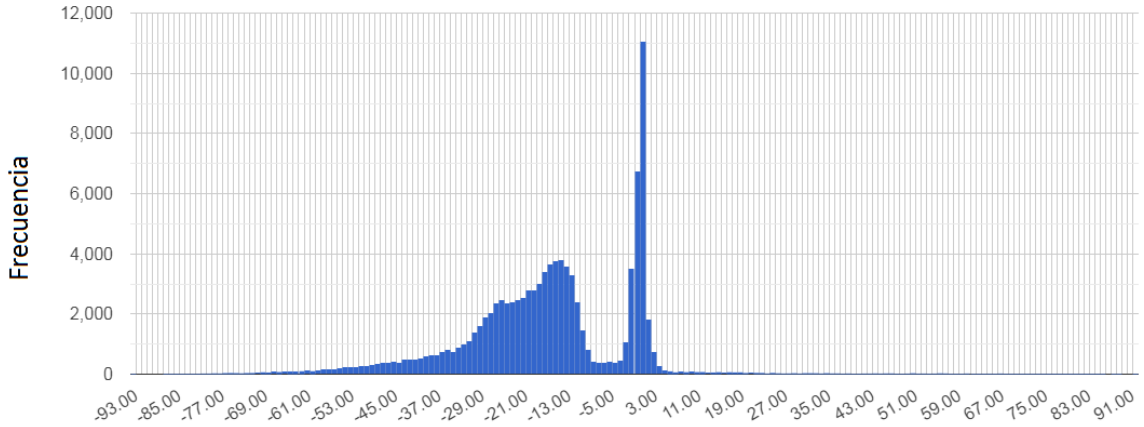


Figura 3. Histograma de cambios de intensidad en la ocurrencia de agua

En la Fig. 4 se muestra un mapa indicando diferentes áreas con distintas clases de transición

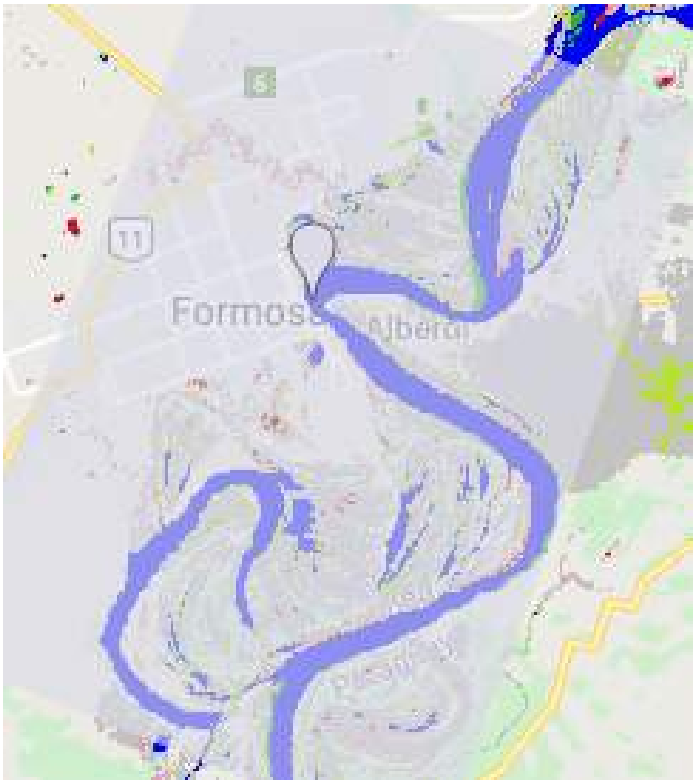


Figura 4. Mapa de clases de transición

En la Fig. 5 se muestra un gráfico de torta, indicando los porcentajes de áreas correspondientes a las distintas clases

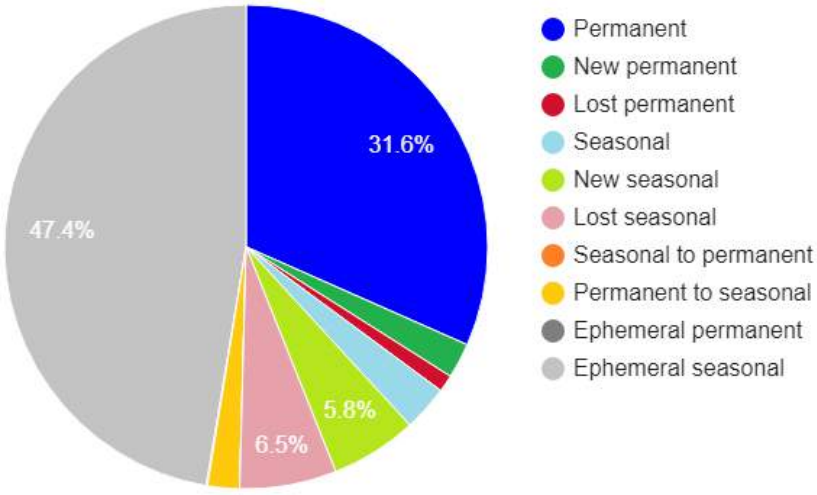


Figura 5. Resumen de áreas de clases de transición

En la Tabla I se resumen en forma detallada las áreas y el porcentaje de áreas para las diferentes clases. Se observa que predominan el área permanente y la estacional efímera

Tabla I. Superficie y porcentaje de áreas para las diferentes clases

Clase	Áreas en m^2	Porcentaje
Permanente	26.097.837	31,6
Permanente nueva	1.938.753	2,3
Permanente pérdida	934.362	1,1
Estacional	2.519.559	3,0
Nueva estacional	4.775.797	5,8
Estacional pérdida	5.338.059	6,5
Estacional a permanente	1.761.108	2,1
Permanente a estacional	1.761.108	2,1
Permanente efímera	70.239	0,1
Estacional efímera	39.080.353	47,4

Para estimar el porcentaje de agua en la región se cuenta el área de píxeles cuya clase de transición y luego se calcula el porcentaje respecto del área total:

```
var areaImage = transition.eq(1).or(transition.eq(2)).or(transition.eq(7)).mul
tiply(ee.Image.pixelArea());

var stats = areaImage.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.sum(),
      geometry: roi,
      scale: 30,
      maxPixels: 1e9
});

var transitionarea = ee.Number(stats.get('transition'));

```

Primero se crea una imagen cuyos elementos tienen el área del píxel correspondiente a la banda de transición si pertenece a una clase permanente (clase igual a 1,2 o 7, correspondiente a permanente, permanente nueva y estacionaria a permanente) y un valor nulo en caso contrario. Esto se logra multiplicando elemento a elemento una matriz booleana (1 si la clase es igual que 1, 2 o 7, 0 si no es el caso) por una matriz que contenga las áreas de cada píxel de la banda. Se realiza la suma de las áreas de los píxeles mediante un reductor.

```
var totalarea = ee.Number(roi.area());

print( transitionarea.divide(totalarea).multiply(100), "%");
```

Por último se obtiene el área de la región poligonal y en base a eso se calcula el porcentaje. Se estima la masa de agua en base a este criterio es del 11,65%.

Cambios de estacionalidad causados por deforestación y el cambio climático

Resulta de interés poder visualizar cambios de estacionalidad causados por la deforestación en la región, para ello se utiliza el historial anual del agua superficial, que contiene información sobre agua permanente y estacional desde 1984 a 2015.
Por una cuestión ausencia de información, se realiza una comparación entre los años 1986 y 2015 mediante el siguiente script:

```
var dataset = ee.ImageCollection('JRC/GSW1_2/YearlyHistory');
var waterhistory1986 = dataset.filterDate('1986');
var waterhistory2015 = dataset.filterDate('2015');

var visualization = {
  bands: ['waterClass'],
  min: 0.0,
  max: 3.0,
  palette: ['cccccc', 'ffffff', 'orange', 'blue']
};

Map.setCenter(-58.00847805175783, -26.116757478164978, 8);

Map.addLayer(waterhistory1986, visualization, 'Water Class 1986');
Map.addLayer(waterhistory2015, visualization, 'Water Class 2015');
```

Este código funciona de forma similar a lo visto en secciones anteriores, puede verse las imágenes obtenidas en la Fig. 6. Pueden observarse el aumento de estacionalidad esperado por la deforestación (mayor área con agua estacional).

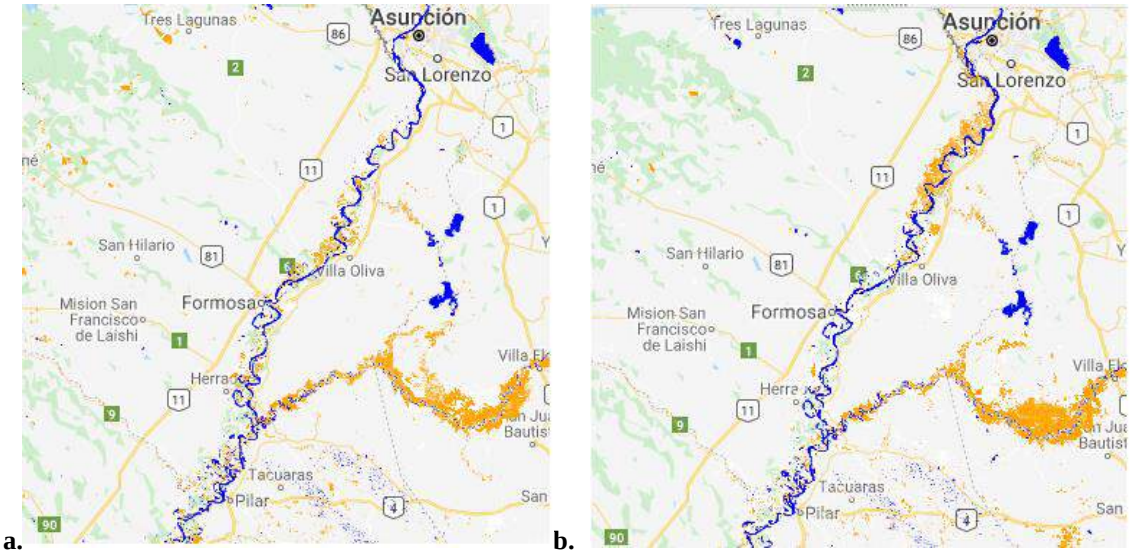


Figura 6. Historial de agua de la región para los años: **a.** 1986 y **b.** 2015. Agua estacional en naranja y permanente en azul.

CONCLUSIONES

Este estudio se cuantificaron las variaciones de agua superficial en la ciudad de Formosa mediante imágenes satelitales, en el periodo de 1984 al 2015. Se destaca la

eficiencia de las imágenes obtenidas mediante datos satelitales GSW (Global Surface Water).
Analizando el histograma obtenido, se tienen muchas zonas con una tendencia negativa en la ocurrencia de agua. Mediante el historial anual de agua también se observa un aumento de la estacionalidad causada por la deforestación.
Realizando los cambios pertinentes se pueden estudiar distintas regiones de interés. Se dispone de una herramienta muy potente para el análisis de agua superficial y para el estudio de la modificación del cauce de los ríos que también puede aplicarse a otras regiones del país.

REFERENCIAS

Do, H.X., Smith, J.P., Fry, L.M. *et al.* Seventy-year long record of monthly water balance estimates for Earth's largest lake system. *Sci Data* **7,** 276 (2020). https://doi.org/10.1038/s41597-020-00613-z

David Ellison, Cindy E. Morris, Bruno Locatelli, Douglas Sheil, Jane Cohen, Daniel Murdiyarso, Victoria Gutierrez, Meine van Noordwijk, Irena F. Creed, Jan Pokorny, David Gaveau, Dominick V. Spracklen, Aida Bargués Tobella, Ulrik Ilstedt, Adriaan J. Teuling, Solomon Gebreyohannis Gebrehiwot, David C. Sands, Bart Muys, Bruno Verbist, Elaine Springgay, Yulia Sugandi, Caroline A. Sullivan. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world, Global Environmental Change, Volume 43, 2017, Pages 51-61, ISSN 0959-3780. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.

Fassoni-Andrade, A. C., Paiva, R. C. D. de, Rudorff, C. de M., Barbosa, C. C. F., & Novo, E. M. L. de M. (2020). High-resolution mapping of floodplain topography from space: A case study in the Amazon. Remote Sensing of Environment. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112065

Fernández-Duque, F., Huck, M., Dávalos, V., & Fernández-Duque, E. (2013). Preliminary study on the ecology, behaviour and demography of the bare-faced curassow (Crax fasciolata) in the gallery forest of the Pilagá river, Formosa, Argentina. Hornero.

Fracassi, N. G., Pereira, J. A., Mujica, G., Hauri, B., & Quintana, R. D. (2017). Estrategias de conservación de la biodiversidad en paisajes forestales del Bajo Delta del Paraná—uniendo a los actores clave de la región. Mastozoologia Neotropical.

Gavilan, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos de pluviómetros. Revista de La Facultad de Agronomía. https://doi.org/10.24215/16699513e011

Gorleri, F.C. (2018) Diversidad y variación estacional del ensamble de Aves en distintas unidades de vegetación y ambiente del Bañado la Estrella Este, Formosa, Argentina. DOI: 10.13140/RG.2.2.32126.48965

Li, Z., Liu, M., Hu, Y., Xue, Z., & Sui, J. (2020). The spatiotemporal changes of marshland and the driving forces in the Sanjiang Plain, Northeast China from 1980 to 2016. Ecological Processes. https://doi.org/10.1186/s13717-020-00226-9

Mataloni, G., Burdman, L., Casa, V., Gonzalez, D., & Masetti, M. C. (2018). Hydrology-driven seasonal changes in the phytoplankton of a subtropical river (Riacho Formosa, Argentina). Boletin de La Sociedad Argentina de Botanica. https://doi.org/10.31055/1851.2372.v53.n2.20575

Mendoza, M. (2003). Range area and seasonal campsites of Toba bands in western Chaco, Argentina. Before Farming. https://doi.org/10.3828/bfarm.2003.4.2

Menni, R. C., Miquelarena, A. M., Lopez, H. L., Casciotta, J. R., Almiron, A. E., & Protogino, L. C. (1992). Fish fauna and environments of the Pilcomayo-Paraguay basins in Formosa, Argentina. Hydrobiologia. https://doi.org/10.1007/BF00006154

Mishra, V., Limaye, A. S., Muench, R. E., Cherrington, E. A., & Markert, K. N. (2020). Evaluating the performance of high-resolution satellite imagery in detecting ephemeral water bodies over West Africa. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102218

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. https://doi.org/10.1038/nature20584

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). Global Surface Water - Data Users Guide (v2). Nature. https://doi.org/10.1038/nature20584

Roy, S., Robeson, S. M., Ortiz, A. C., & Edmonds, D. A. (2020). Spatial and temporal patterns of land loss in the Lower Mississippi River Delta from 1983 to 2016. Remote Sensing of Environment. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112046

Xu, P., Herold, M., Tsendbazar, N. E., & Clevers, J. G. P. W. (2020). Towards a comprehensive and consistent global aquatic land cover characterization framework addressing multiple user needs. In Remote Sensing of Environment. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112034

APORTES DEL RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO A LA HIDROGEOLOGÍA LOCAL EN EL ABANICO ALUVIAL DEL CAPAYÁN, VALLE ANTINACO-LOS COLORADOS, LA RIOJA

Clara X.[a] *y* Miguel R. E.[b]

[a]*Escuela de Ingeniería, Departamento de Ciencias Básicas y Tecnológicas, Universidad Nacional de Chilecito, ARGENTINA*
[b]*Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, Centro Regional Catamarca-La Rioja; Estacion Experimental Agropecuaria Chilecito, ARGENTINA*

e-mail: xavierclara92@gmail.com

RESUMEN

Los estudios hidrogeológicos en La Rioja son fundamentales, ya que esta provincia se caracteriza por utilizar agua subterránea como principal fuente de abastecimiento de agua potable, industrial y riego. La mayoría de los trabajos hidrogeológicos antecedentes en La Rioja han utilizado datos de altura de boca de pozo respecto al nivel de mar calculados por interpolación de cartas topográficas, sistemas de información geográfica de acceso libre o modelos digitales de elevación. Sin embargo, las investigaciones hidrodinámicas a escala local requieren de datos exactos de altura de boca de pozo para trazar curvas equipotenciales y líneas de flujo sin distorsiones. El objeto de este trabajo es comparar los datos de altura de boca de pozo medidos con diferentes métodos en el área del abanico aluvial del Capayán, Valle Antinaco- Los Colorados, La Rioja. Se efectuaron cálculos de altura de boca de pozo bajo cuatro métodos: interpolación lineal de curvas por Carta Topográfica; Google Earth Pro; modelo digital de elevación y GPS Geodésico bajo el método de medición denominado "estático rápido" con captura de datos en un lapso de 20 minutos post-procesado. Los resultados muestran que los datos con GPS Geodésico presentan una exactitud promedio de 0,15±0,015m, con diferencias de -0,984±2,292 respecto a modelos digitales de elevación; Google Earth Pro de -2,58 ±2,76m y superiores a los 30 m con Carta Topográfica. Las diferencias de altura de boca de pozo entre los diferentes métodos conllevan a que, en caso de bajos gradientes hidráulicos, las líneas de flujo de agua subterránea presenten direcciones distorsionadas con los datos calculados con las cartas topográficas, Google Earth Pro y modelos digitales de elevación. Al igual que en zonas de llanura, para una representación de detalle de flujos a escala local, se recomienda utilizar métodos que brinden un dato lo más exacto posible, como el uso de un GPS geodésico.

Palabras Clave: altura de boca de pozo, hidrodinámica, GPS geodésico

INTRODUCCIÓN

La provincia de La Rioja presenta escasos caudales de agua superficial, razón por la cual, su desarrollo poblacional, agrícola e industrial se sustentan principalmente en base a la construcción de pozos para la captación de agua desde los sistemas acuíferos, por lo tanto, los estudios hidrogeológicos (hidrodinámicos e hidroquímicos) son fundamentales para conocer su funcionamiento.

Dentro de los estudios hidrogeológicos, es de relevancia analizar las direcciones de flujo de agua subterránea, las cuales se calculan por interpolación de niveles piezométricos de una red de pozos, para ello es fundamental conocer la profundidad del agua subterránea en los pozos detenidos (sin bombeo) pero también contar con un valor preciso de cota topográfica (ver Fig. 1). Mientras que los datos de profundidad de agua subterránea se obtienen mediante la medición con sondas piezométricas, los valores de cotas han sido tradicionalmente calculados por interpolación en Cartas del Instituto Geográfico Militar (actualmente Instituto Geográfico Nacional), aunque cuando no existen herramientas de precisión o los terrenos presentan dificultades para nivelación óptica o similar, se utilizan valores aportados por la herramienta "relieve" de Google Earth Pro o Modelos Digitales de Elevación. No obstante, la utilización de GPS Geodésico constituye una herramienta que permite ajustar las alturas de pozo con elevada precisión ±0,15 metros respecto a un punto geodésico ajustado previamente.
Cuando el agua subterránea presenta un bajo gradiente hidráulico, contar con valores lo más exactos posibles de cota de pozo permite conocer de igual manera las direcciones de flujo de agua subterránea.

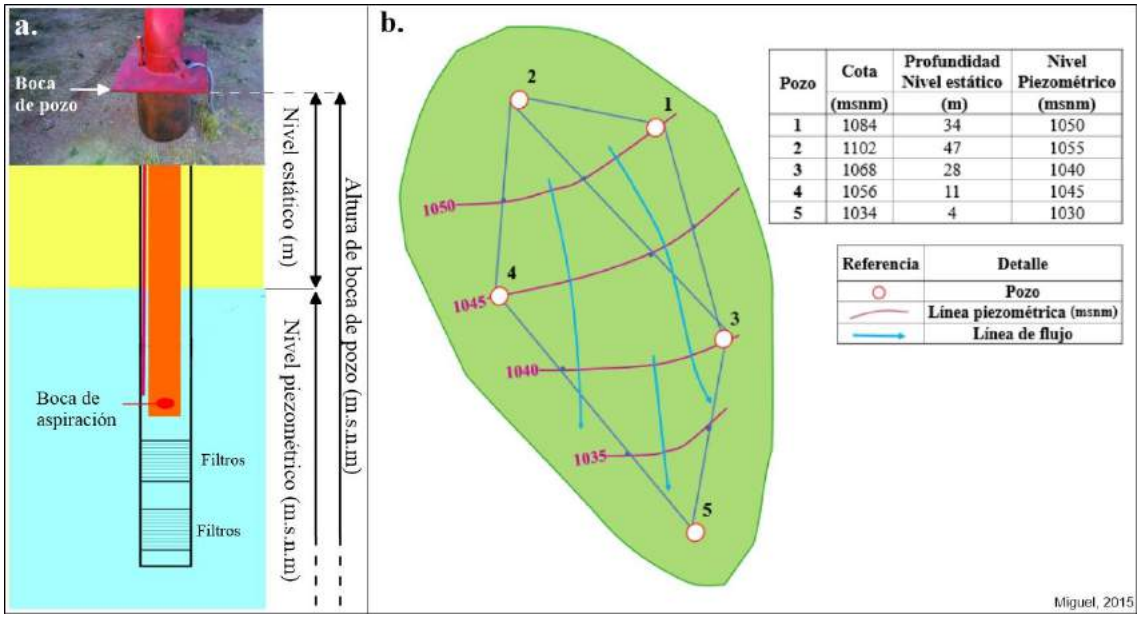


Figura 1. a. Perfil esquemático de un pozo de bombeo y niveles de interés hidrogeológico
b. Esquema de red de pozos (tomado y adaptado de Miguel, 2015)

El abanico aluvial del Río Capayán, donde se desarrolló este trabajo, se localiza al centro del Valle Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja (ver Fig. 2). Este valle de origen tectónico, se encuentra rodeado al Oeste por las Sierras de Famatina y Sierras del Paimán y al Este por las Sierras del Velasco. En el área de estudio se observa una marcada variación altitudinal, con coalescencia de abanicos aluviales del cuaternario reciente del Río Capayán (Noroeste), Río Los Sarmientos (Sudoeste) y Río Quebrada Grande o Puquitay (Este). Hacía el Este, y sobre las áreas de coalescencia se encuentra el cauce del Río Grande, que colecta y escurre los flujos de crecidas estivales desde los abanicos aluviales hacia las playas salinas al Sur de la Cuenca.
Esta área del abanico aluvial del Río Capayán se desarrollan desde el año 2010, y con un fuerte incremento de la explotación de agua subterránea desde el 2016, emprendimientos olivícolas que se abastecen integralmente de este recurso. En tal

sentido, desde el año 2018 se monitorea el sistema acuífero para conocer su hidrodinámica ante el bombeo intensivo para lo cual resulta de relevancia conocer las alturas de boca de pozo.
El objetivo de este trabajo es comparar los datos de altura de boca de pozo medidos con diferentes métodos en el área del abanico aluvial del Capayán, Valle Antinaco- Los Colorados, La Rioja.

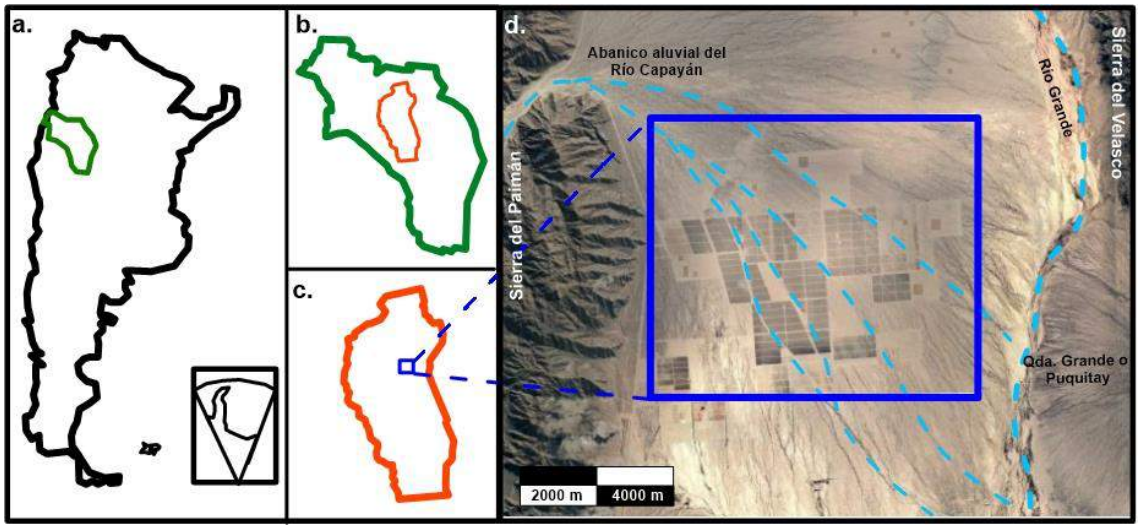


Figura 2. a. Argentina y provincia de la Rioja. **b.** Provincia de La Rioja y cuenca Antinaco-Los Colorados. **c.** Cuenca Antinaco-Los Colorados y Abanico aluvial del Río Capayán. **d.** Abanico aluvial del Río Capayán y área de estudio.

MÉTODOS

Se recopiló información antecedente de trabajos de nivelación previos en el área, como el informe de INTA elaborado por Damiano et al. (2018) en el cual tres pozos del área del abanico aluvial del Río Capayán fueron amojonados previamente asignándoles coordenadas Gauss Kruger X, Y, Z. Los puntos base para determinar estas coordenadas fueron extraídos de la red de puntos confeccionada por el I.G.N. (Instituto Geográfico Nacional) tomando su cota y trasladándola a las bocas de pozos mediante GPS Geodésico.
Se visitaron las Fincas localizadas en el sector, que se abastecen íntegramente de agua subterránea, se localizaron los pozos y se midieron las alturas de boca de otros 29 pozos con GPS Geodésico Diferencial (Spectra SP60 RTK®) bajo el método de medición estático rápido teniendo una apertura de medición de 20 minutos por pozo. Para ello, la base se localizó en el Pozo 3, que se mantiene encendida obteniendo datos de medición durante toda la campaña, mientras que el rover se transportó a la boca de cada pozo que debía ser relevado. Este procedimiento tuvo una duración de medición de 20 minutos donde el aparato reúne información de posicionamiento a través de los satélites alcanzando un error de medición post- procesado que osciló entre 0,05 y 0,15 m en la vertical (coordenada Z) (ver Fig. 3). Bajo las coordenadas (X, Y), medidas en campo por GPS Geodésico Diferencial, se obtiene la posición de las bocas de pozo.
Las cotas de altura se calcularon mediante un modelo digital de elevación descargado desde el Servicio Geológico de Estados Unidos (SRTM1S30W068V3) y digitalizado para su interpretación en Q_{GIS}® 3.14. De manera similar, se utilizó la función “relieve” de Google Earth Pro para obtener la cota topográfica para las bocas de pozos.

Un trabajo particular debió efectuarse para la obtención de los datos desde la Carta Topográfica 1:100.000 Hoja 2966-19 Chilecito (1984) ya que ésta se encuentra bajo coordenadas Campo Inchauspe Faja 3, cuando a priori debería considerarse la Faja 2, adoptada para este trabajo. Previo recálculo de las coordenadas medidas en campo bajo el Software Libre en línea Sumapa.com se localizaron los puntos en la Carta Topográfica y por interpolación se calcularon las cotas.
Los valores de cota calculados bajo cada método se cargaron en tablas en Microsoft Excel® 2010 computándose la mínima, media y máxima y desvío estándar. A modo comparativo se mapearon las curvas de nivel con los datos calculados bajo cada método, para ello se utilizó la función de interpolación por kriging (método geoestadístico) disponible en el programa Q_{GIS}® 3.14.



Figura 3. a. Instalación de base de GPS Geodésico **b.** Nivelación del Rover en boca de pozo (Fotos: Miguel, R.E.)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I se presentan los datos de las mediciones de boca de pozo bajo cuatro métodos de determinación y su estadística descriptiva. Se considera que el método GPS Geodésico representa el valor de menor error en la medición ya que recopila y triangula durante los 20 minutos utilizando aproximadamente 24 satélites. En la tabla se destacan en negrita los valores de modelo digital de terreno y Google Earth Pro que presentaron diferencias menores al metro respecto a lo calculado por GPS Geodésico.
Se advierte que ocho de las 32 cotas determinadas por el modelo digital de elevación (25 %) presentan diferencias menores al metro respecto a GPS Geodésico, mientras que con Google Earth Pro cuatro cotas (12 %) presentan esta variedad.

Tabla I. Altura de boca de pozos bajo diferentes métodos de determinación
(en negrita valores con menos de 1 m de diferencia respecto a GPS Geodésico)
GPS:, GPS geodésico; MDE, modelo digital de terreno; GEP, calculado por Google Earth Pro; IGM, Hoja 2966-19 Chilecito

Pozo	X	Y	GPS	MDE	GEP	IGM
1	2653948,895	6787346,065	1035,81	**1036,00**	1037,00	1003,10
2	2653666,238	6787947,745	1048,23	1051,00	1051,00	1022,70
3	2652560,980	6787116,653	1046,56	1049,00	1043,00	1019,30
4	2652530,711	6788067,332	1065,37	1064,00	1068,00	1039,30
5	2654439,145	6787478,253	1032,14	1034,00	1035,00	1003,00
6	2654372,112	6788142,650	1041,36	1039,00	**1042,00**	1018,10
7	2651425,918	6788017,996	1077,66	1079,00	1080,00	1052,60
8	2655233,826	6788174,541	1030,16	1032,00	1034,00	997,80
9	2655274,101	6787277,040	1021,48	**1021,00**	1024,00	986,80
10	2656449,430	6786295,599	1002,39	997,00	1004,00	965,30
11	2655991,035	6788203,659	1021,05	1024,00	1026,00	990,30
12	2656746,781	6788237,555	1013,08	**1013,00**	1015,00	984,40
13	2657514,064	6788259,026	1005,28	**1005,00**	1007,00	982,60
14	2656775,235	6787368,938	1005,87	1008,00	1009,00	973,50
15	2651500,520	6787543,328	1066,66	1068,00	1071,00	1043,40
16	2658264,854	6788308,172	996,70	998,00	999,00	982,80
17	2655167,754	6789829,334	1044,50	**1044,00**	1038,00	1028,10
18	2653554,142	6789766,530	1072,76	**1073,00**	**1072,00**	1055,30
19	2655922,556	6789863,240	1033,76	**1033,00**	1038,00	1011,50
20	2654259,067	6785234,900	1003,90	**1004,00**	1007,00	957,90
21	2654184,764	6786724,979	1024,05	1023,00	**1025,00**	987,10
22	2652895,999	6785471,374	1016,59	1019,00	1021,00	975,00
23	2651775,437	6787007,461	1052,48	1058,00	1060,00	1023,10
24	2653354,754	6786718,457	1031,35	1028,00	**1031,00**	991,50
25	2653358,231	6784699,014	1003,03	1008,00	1009,00	962,50
26	2652752,480	6784924,105	1010,52	1015,00	1016,00	972,20
27	2654996,679	6784556,746	991,62	993,00	994,00	946,50
28	2652795,987	6783795,817	993,12	996,00	998,00	959,10
29	2653519,831	6783822,186	992,28	995,00	998,00	953,10
30	2654131,015	6783845,105	988,58	990,00	993,00	946,30
31	2656251,011	6784607,676	986,88	988,00	988,00	948,60
32	2651118,927	6786974,377	1058,32	1060,00	1063,00	1028,20
Valor medio			1025,42	1026,41	1028,00	994,09
Valor Máximo			1077,66	1079,00	1080,00	1055,30
Valor Mínimo			986,88	988,00	988,00	946,30
Desvío Estándar			26,44	26,38	25,94	31,99

En cuanto a las cotas I.G.N. se observan marcadas diferencias. Cabe destacar que las curvas de nivel en la carta presentan una equidistancia de 25 y 100 m para el área de estudio y que su trazado se efectuó bajo Fotogravimetría. No obstante, al recorrer el terreno a campo y comparar con los otros sistemas empleados, se presupone que hay un error en la interpretación de la carta o al menos un error en el valor de curva de nivel informado que podría ser de 25 m. Inclusive, sobre una cota de terreno de 1005 m.s.n.m. y un azimut se observan valores de cota similares con lo medido con GPS Geodésico, sin embargo, estos parecieran estar en una pronunciada elevación, que en campo se comprobó que no existe (ver Fig. 4).

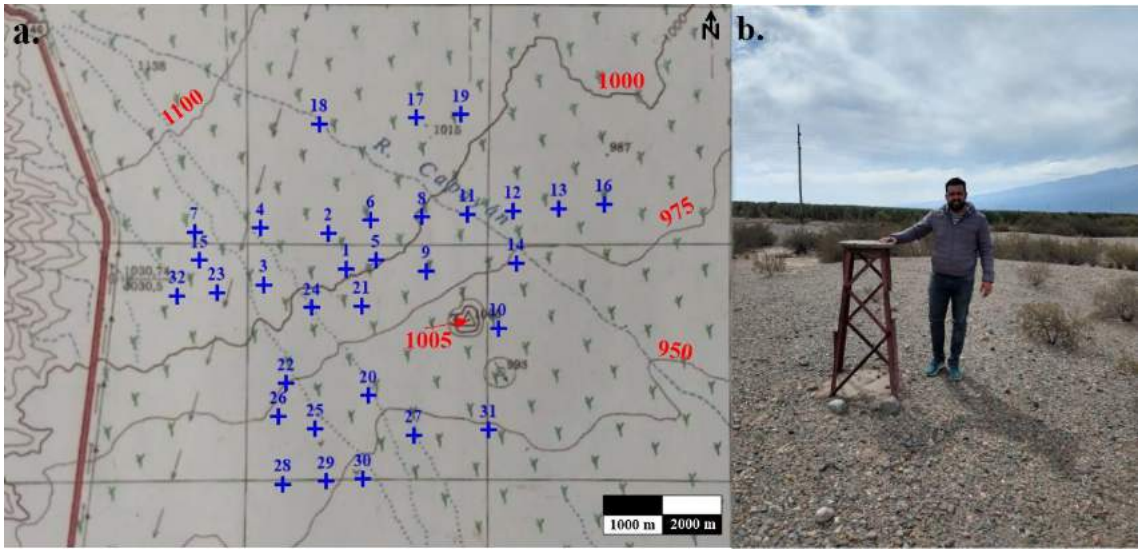


Figura 4. a. Sección de Carta Topográfica Hoja 2966-19 Chilecito. **b.** Fotografía del área destacada como elevación en terreno en carta topográfica (Foto: Miguel, R.E.)

Las curvas de nivel (ver Fig. 5) elaboradas con los datos expuestos en la Tabla I muestran los cambios entre los diferentes métodos al ser mapeadas.

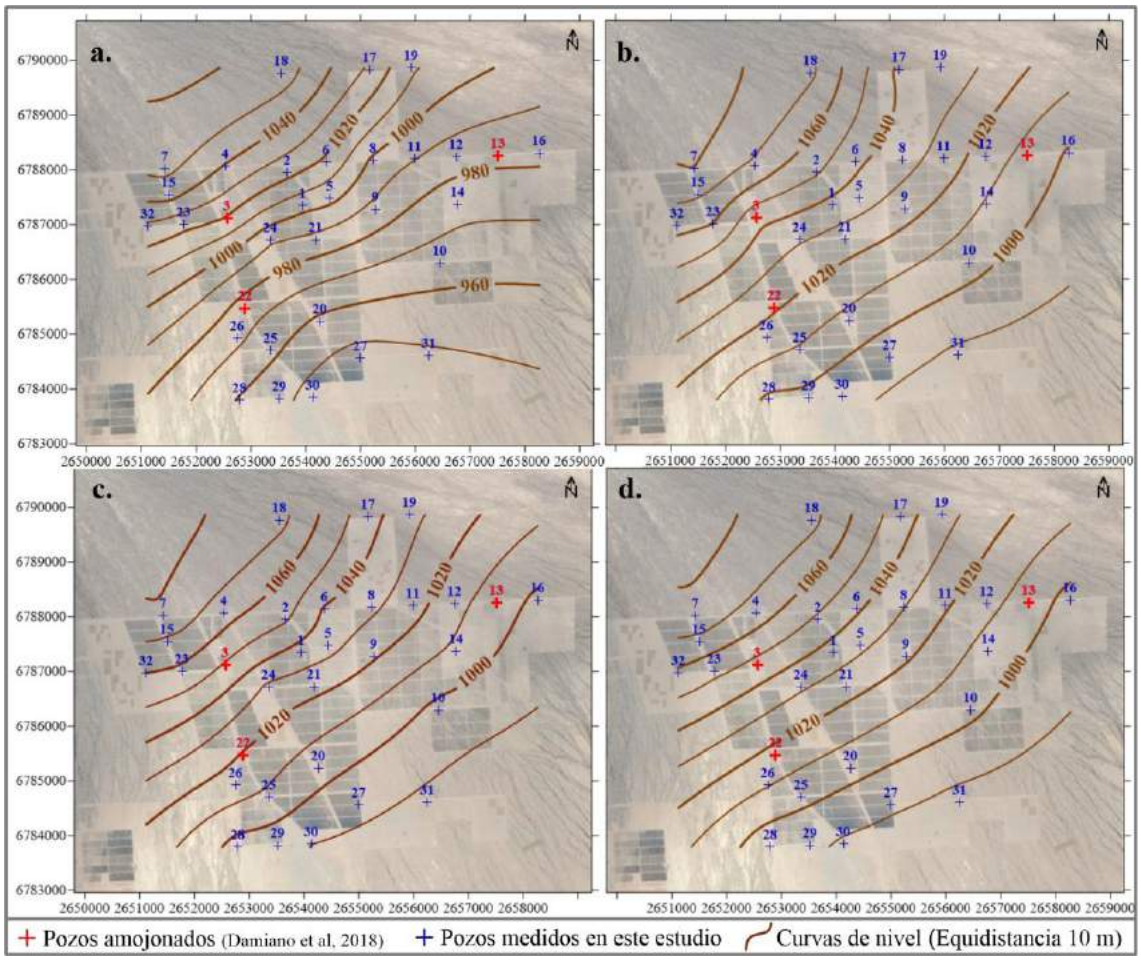


Figura 5. Curvas de nivel en área bajo diferentes métodos de determinación y/o cálculo **a.** Interpolación de cotas de carta I.G.M. **b.** Interpolación de cotas de Google Earth Pro **c.** Interpolación de cotas por M.D.E (30m) **d.** Interpolación de cotas por GPS Geodésico

La principal diferencia se observa entre las curvas mapeadas con los datos desde la carta topográfica (ver Fig. 4 a.), donde más allá de la marcada distorsión observada hacia el sudeste, los valores de cota resultan menores a los medidos con GPS geodésico, modelo digital del terreno y Google Earth Pro. En particular, la mayor y menor diferencia de cota se observa en el pozo 20 y el pozo 16, con 45,1 m de y 13,9 m; respectivamente.
En cuanto a las curvas trazadas con modelo digital del terreno (ver Fig. 4 b.) y Google Earth Pro (ver Fig. 4 c.), estas son similares, pero presentan diferencias en las trazas en inmediaciones de algunos pozos con valores de mayor y menor cota en los pozos 3 y 17; y pozos 7 y 10, con 6 y -7,0 m; respectivamente. Por otro lado, los pozos 2 y 31, presentan igual cota.
El modelo digital del terreno, si bien tiene una exactitud de 1 m en la vertical, presenta la mayor cantidad de valores coincidentes (diferencias menores a un metro) con respecto al GPS Geodésico, situación que se advierte claramente en las figuras, sin embargo, se observan marcadas distorsiones hacia el Sudeste (pozos 10, 25, 26, 28 y 30) y hacia el Centro y Noroeste con los pozos 6 y 23.
Por último, cabe destacar que el análisis con curvas de nivel servirá para comparar los diferentes métodos en la obtención de datos; sin embargo, para modelar la superficie terrestre como la que se ha estudiado (terreno con desniveles pronunciados) se deberá tomar una mayor cantidad de puntos y no solo puntos aislados como fueron las bocas de pozos.

CONCLUSIONES

Los datos de elevación para la boca de pozo con GPS geodésico representan la mejor alternativa en estudios hidrogeológicos de escala local y de detalle.
Para el área estudiada, la interpolación con carta topográfica no representa una opción aconsejable ya que presenta trazas de curvas de nivel distorsionadas y con marcadas diferencias de cotas.
Los datos del modelo digital del terreno y Google Earth Pro presentan valores similares entre sí, sin embargo, en algunos pozos existen marcadas diferencias de cota respecto a los calculados con el GPS geodésico.
Las diferencias de altura de boca de pozo medidas advierten que, en caso de bajos gradientes hidráulicos de agua subterránea en el área, las líneas de flujo de agua subterránea presenten direcciones distorsionadas, cuestión que se evaluará con datos de niveles estáticos en un futuro documento. Al igual que en zonas de llanura, para una buena representación de detalle de flujos a escala local, se recomienda utilizar metodologías que brinden un dato lo más exacto posible, como el uso de GPS geodésico.

AGRADECIMIENTOS

Al Convenio de Cooperación Científica INTA-Unión Agraria N° 24995 y al Convenio INTA-Alubry San Pedro N° 25846. Al Proyecto Estructural INTA 041 2018-2022 “Aportes a la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas del sistema agroalimentario argentino”. Al Estudio de Agrimensura y Arquitectura BAC y al Ing. Rafael Ocampo por brindar el equipo Spectra SP60 RTK.

REFERENCIAS

Damiano, F.; Vitale, J.P. y Miguel, R.E. Relevamiento de cota de boca de pozo en Valle Antinaco-Los Colorados. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2018)

García, J.W.; García, J.J.; Robador, A.I.; Valladares, H.M., Vallejos, C.S. Hidrogeología del sector Norte del Valle de Chilecito. Departamentos de Famatina y Chilecito. Provincia de La Rioja. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Catamarca. 2016. ISBN: 978-987-661-224-1: Hidrogeología Regional. pp 183-190 (2016).

Miguel, R.E.; Tálamo, E.; Cristos, D.S.; Gonzalez Ribot, J.V.; Chayle, L. Análisis y evolución del proceso de salinización del sistema acuífero Antinaco Los Colorados en las Colonias de Vichigasta y Catinzaco, La Rioja, Argentina. Actas del IX Congreso Argentino de Hidrogeología 2016. Calidad de Agua Subterránea 304-311 (2016)

Miguel, R.E. Evolución hidrogeológica del abanico aluvial del Capayán, Departamento de Famatina, La Rioja en el período Julio 2017- Julio 2019. Informe N°1. Convenio Unión Agraria-INTA Nro 24.995. 10 pp. Inédito.

Miguel, R.E. Evolución hidrogeológica del abanico aluvial del Capayán, Departamento de Famatina, La Rioja en el período Julio 2018- Julio 2020. Informe N°1. Convenio Alubry San Pedro-INTA Nro 25.846. 11 pp. Inédito.

I.G.N. Carta Topográfica Hoja 2966-19 Chilecito. 1:100.000. Instituto Geográfico Militar (1984)

U.S.G.S. Modelo digital de terreno SRTM1S30W068V3. Servicio Geológico de Estados Unidos (2010)

DETECCIÓN DE CAMBIOS EN EL ÁREA CULTIVADA DEL VALLE INFERIOR DEL RÍO NEUQUÉN ENTRE 2002 Y 2019

Cogliati M. G.[a] y Finessi F. G.[a]

[a]*Departamento de Geografía, FAHU, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA*

e-mail: marisa.cogliati@fahu.uncoma.edu.ar

RESUMEN

En los últimos años, la zona del valle inferior del río Neuquén ha experimentado crecimiento urbano, con un notable avance de las ciudades sobre distintas áreas y aumento de zonas de explotación hidrocarburífera, con pérdida de terreno productivo sobre el piso del valle. Generando la reconversión de los cultivos y la expansión de la frontera agrícola, con la incorporación de zonas bajo riego en áreas vulnerables sobre las mesetas de la margen norte. La finalidad del presente trabajo, fue estudiar las variaciones espaciales y temporales de las áreas asociadas a cultivos en la zona norte del valle inferior del río Neuquén, utilizando el índice de vegetación, obtenido a partir de información de sensores remotos (ópticos) (productos MODIS, MYD13Q1) para el período 2002-2019. El trabajo contempla el análisis de las áreas asociadas a distinto tipo de cobertura del suelo, mediante la identificación de rasgos comunes y la variabilidad temporal, mediante el estudio de tendencias estacionales. La información de índices de vegetación a partir de los productos MODIS, permite contar con información cronológica de toda el área cada 16 días, lo que facilita el seguimiento estacional y durante un periodo de 17 años, mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) para el tratamiento, análisis y cartografía de las áreas asociadas a los distintos usos de suelo.

Palabras Clave: MODIS, NDVI, vegetación, tendencia estacional.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la zona del valle inferior del río Neuquén ha experimentado crecimiento urbano, con un notable avance de las ciudades sobre distintas áreas y aumento de zonas de explotación hidrocarburífera, con pérdida de terreno productivo sobre el piso del valle.

La cobertura del suelo incluye el conjunto de características naturales y modificadas por el hombre que cubren la superficie terrestre. Por ello es importante el mapeo de la cobertura del suelo, para conocer los usos antrópicos que pudieran afectar los hábitats naturales (Cogliati, 2017). Según diversos autores, a partir de las décadas de 1960 y 1970 las modificaciones en el uso y apropiación de las tierras, propiciaron la expansión territorial hacia nuevos espacios productivos (Radonich et al, 1999; Steimbreger et al, 2003; Chiementon, M. E. and Cogliati, M. G. 2011; Finessi F.G. and Groch D., 2012). Estos autores plantean que la frontera urbana, agropecuaria e hidrocarburífera, junto a las nuevas lógicas territoriales se expanden, manifestándose de forma clara en la superposición de usos del suelo y la creciente confrontación por el control y la apropiación de los recursos.

La utilización de imágenes de satélite mediante el procesamiento digital, utilizando un Sistema de Información Geográfico (SIG), proporciona datos sobre la distribución espacial y temporal de la vegetación. Wessels et al, 2004 aplicaron datos MODIS para

el mapeo de cobertura del suelo con resolución moderada (250/500 m), para fines conservacionistas a escala regional en el estado de Pará, Brasil y Yellowstone, EE. UU., con resultados exitosos para desarrollar un producto bosque/ no bosque, adecuado para monitorear los impactos humanos como por ejemplo la deforestación. Otros autores realizaron mapeo de la vegetación a partir de imágenes satelitales (Rasuly et al, 2010; Mancino et al, 2014).
Martinuzzi et al, 2008 desarrollaron un método de mapeo de la vegetación y hábitats en una reserva forestal tropical seca integrando el NDVI obtenido de imágenes LANDSAT, información topográfica e imágenes IKONOS de alta resolución. Guo et al, 2014 analizaron los cambios en la vegetación de Mongolia, en una escala temporal de orden mensual y estimaron sus respuestas para el periodo 1983-2006, en áreas sin impacto antrópico. Wang et al. 2014 estudiaron los cambios en el NDVI y su relación con la precipitación en China, con resultados que indicaron a través del índice una tendencia creciente entre 1982-2006, en bosques de coníferas boreales, en sistemas de montaña templados y en bosques caducifolios tropicales.
En este trabajo, se analizaron las variaciones espaciales y temporales de las áreas asociadas a cultivos en la zona norte del valle inferior del río Neuquén, utilizando el índice de vegetación, obtenido a partir de información de sensores remotos (ópticos) (productos MYD13Q1) para el período 2002-2019.

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

El valle inferior del río Neuquén, se desarrolla en las márgenes del curso inferior del río, desde el sector del Complejo Hidroeléctrico Cerros Colorados hasta la confluencia con el río Limay (ver Fig. 1). La región presenta un clima árido, con temperatura media anual de 14.2ºC, las escasas precipitaciones se distribuyen mayormente durante el invierno, sin superar los 200 mm anuales. La evapotranspiración estival es alta, de manera que en los meses de verano se produce déficit hídrico, que es compensado con sistemas de regadío en las zonas de producción agropecuaria (Finessi F.G. and Groch D., 2012).

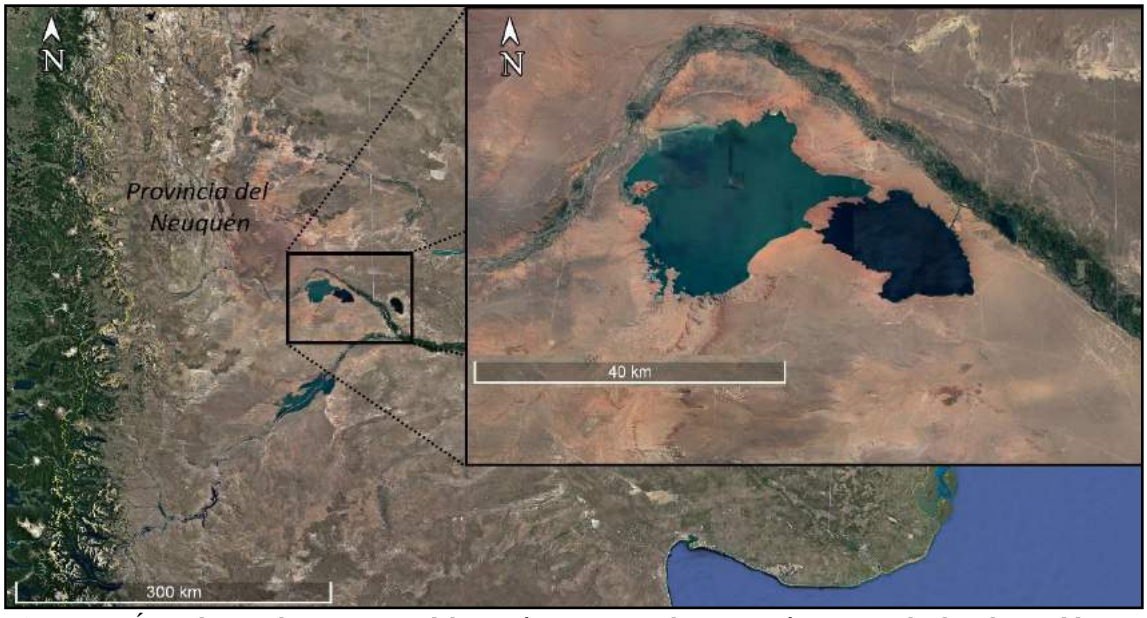


Figura 1: Área de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes satelitales disponibles en Google Earth Pro 7.3.3.7786 (64-bit).

Los relieves dominantes son el valle fluvial y las terrazas de erosión fluvial, compuesto por rocas sedimentarias del grupo Neuquén, fácilmente erosionables, coronadas por un conglomerado de vulcanitas pliopleistocénicas cementados por carbonato de calcio, de mayor resistencia a los procesos erosivos (Capua et al, 2000). A través de la implementación de diversos tipos de tecnología, se han logrado mejorar las condiciones agroecológicas del área, para mantener la capacidad del suelo y desarrollar las actividades frutihortícolas y vitivinícolas en la región.
Para el trabajo se utilizaron los productos MYD13Q (Aqua Vegetation Indices L3 Global 250 m SIN Grid), obtenidos del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite AQUA a partir de las escenas de 16 días con una resolución espacial de 250 metros (Didan, 2015). El MYD13Q1 proporciona dos capas de información, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), y el EVI (Enhanced Vegetation Index), a partir de un algoritmo que selecciona el mejor valor de píxel disponible en el período. Las escenas empleadas se descargaron del centro de archivos AρρEEARS[1], donde se puede explorar y descargar las imágenes para su análisis.



Figura 2: Imagen satelital visible del área de estudio para diciembre de 2002 / diciembre de 2016.

METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza el análisis de tendencia estacional, para el análisis de una serie temporal de imágenes de NDVI obtenida a partir de información del sensor MODIS combinada cada 16 días. El procedimiento extrae la señal para una serie de tiempo a partir de análisis armónico, que calcula la amplitud y fase de la onda estacional, y en base a ella se obtiene la tendencia temporal, para cada uno de esos parámetros (Eastman et al, 2009).
La identificación de las tendencias temporales del NDVI, se efectuó mediante el cálculo de la tendencia lineal Theil Sen a nivel de píxel, a lo largo de toda la serie temporal. La significancia estadística se obtuvo a partir de la metodología de Mann Kendall contextual, analizada a nivel de píxel, para la identificación de las regiones significativas (Neeti et al, 2011).
El análisis de tendencia estacional difiere de los análisis fenológicos tradicionales, pero existe correspondencia con las medidas fenológicas tradicionales. Con eso en mente, la amplitud 0 representa el valor anual medio del NDVI, esperando que se correlacione fuertemente con la productividad primaria bruta anual. La Amplitud 1 es efectivamente la diferencia entre los valores mínimos y máximos de NDVI, a lo largo del año con

[1] https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/

variaciones menores suavizadas, y expresa el rango anual de NDVI. La fase 1 es similar al índice de cambios estacionales y expresa, la posición angular del inicio del ciclo (enero). La amplitud 2 y la fase 2 son difíciles de interpretar, podemos decir que nominalmente representan la magnitud y posición de una curva semestral, ese componente semestral es principalmente un modificador de la forma de la curva anual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3a) presenta las áreas con tendencia significativa a distintos niveles y la Figura 3b) presenta los valores de tendencia. En las zonas aledañas a la ciudad de Añelo sobre la ladera y la superficie de la meseta, se presentó una tendencia negativa significativa al 90%, lo que se asocia con descenso de los valores de NDVI en el tiempo. El análisis en particular de estas áreas concluyó que se encuentran en zonas con explotación hidrocarburífera actual, con nuevas urbanizaciones o con lotes de chacras abandonadas.

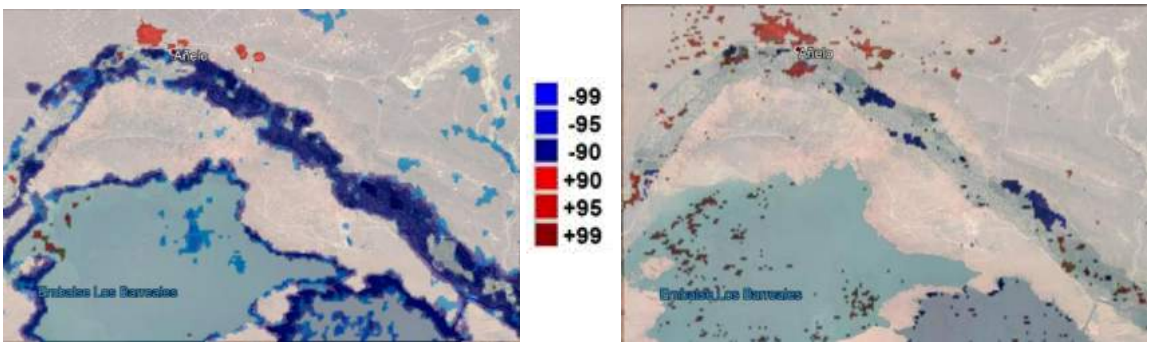


Figura 3: a) (izquierda) áreas con tendencia significativa de A0 al 90%, 95% y 99% (azul más claro al más oscuro) superpuesto a Google Earth. 3b) tendencia de A0 para NDVI entre 2002 y 2018 (positiva-rojo, negativa- azul).

Estas actividades tienen como característica común la extracción o disminución de la vegetación natural o productiva o bien su reemplazo por edificaciones, calles, etc. A partir de los resultados presentados en la Figura 3 se efectuaron ampliaciones de las áreas con tendencias significativas, utilizando información disponible en Google Earth y se analizaron los cambios visibles. La Figura 4, presenta la ampliación de un área con tendencia negativa al norte de la ciudad de Añelo, donde se puede notar el avance de la edificación sobre un área de ladera y pedimento de la meseta entre 2006 y 2018, estos cambios fueron bien detectados por la resolución espacial del sensor MODIS.



Figura 4: Evolución en el tiempo en P1 figura 2 que muestra tendencia negativa significativa al 99% del NDVI. (a) imagen 28/04/2006, b) imagen 18/12/2018.

En la Figura 5 se presenta una amplia zona con parcelas dedicadas actividades frutícolas. En la ampliación efectuada con Google Earth, en canales visibles se puede detectar el aumento de la vegetación en las parcelas, así como una subdivisión en parcelas de menor tamaño, en esta zona, la metodología detecta una tendencia positiva en la onda anual del NDVI, que representa una mayor cobertura de vegetación en este caso dedicada a la producción frutihortícola.



Figura 5: Imagen satelital de 28/04/2006 (a) y del 19/12/2017 (b) en P2 de la Figura 2.

En función del análisis de la tendencia de A1 (Figura 6), podemos inferir que el rango de NDVI presentó principalmente valores de tendencias positivas indicando incrementos en las diferencias entre mínimos y máximos de NDVI, estos valores presentaron significancia al 90%, 95% o 99% según el área. Siendo significativos principalmente en zonas dedicadas a la producción frutícola, mientras que los máximos y mínimos se asociarían a los cambios fenológicos típicos de los cultivos del área.
El rango anual presenta mayores tendencias en la zona del piso del valle, siguiendo el curso del río y tendencias no significativas en zonas de escurrimiento superficial intermitente coincidiendo con el área de suelo desnudo.

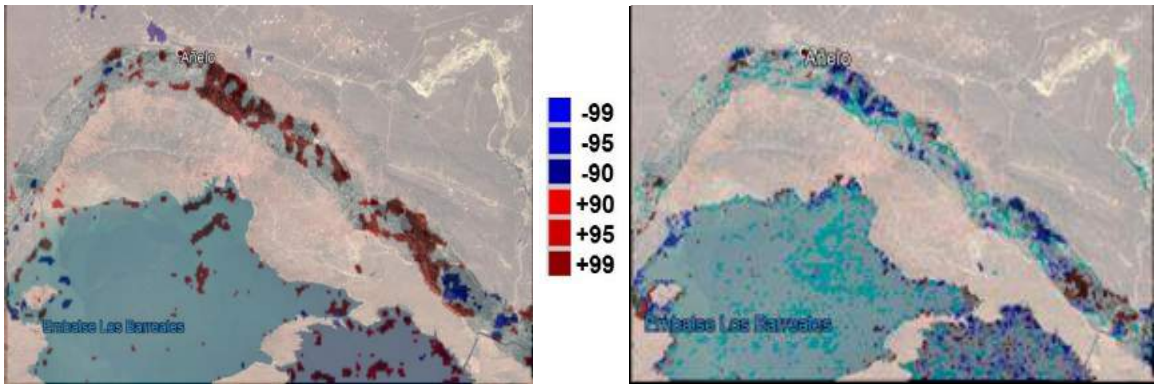


Figura 6: a) (izquierda) áreas con tendencia significativa de A1 al 90%, 95% y 99% (positiva- rojo, negativa- azul) superpuestas a Google Earth. b) Tendencia de A1 entre 2002 y 2018 (positiva- rojo, negativa- azul).

En el caso del análisis de A2 (ver Fig. 7), la tendencia significativa se asoció exclusivamente a zonas de actividad productiva donde se pone de manifiesto una mayor estacionalidad del comportamiento del NDVI asociado a los cultivos y a las variaciones estacionales de la vegetación natural.

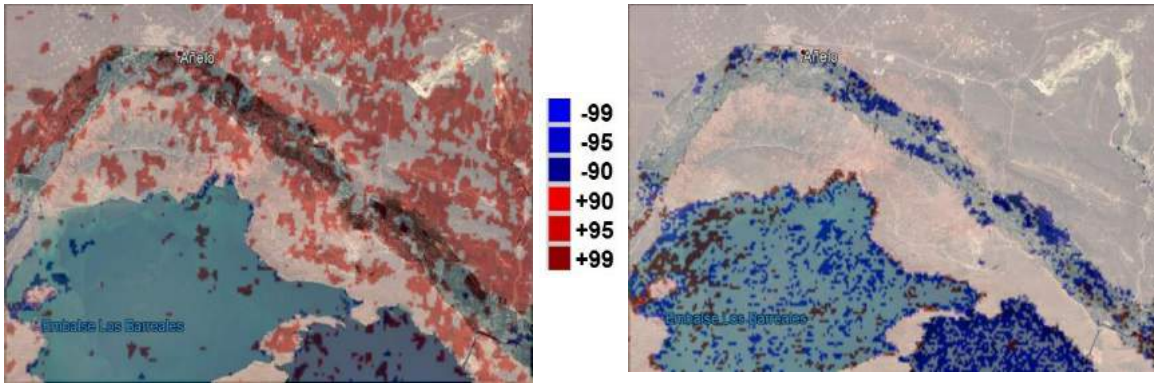


Figura 7: a) (izquierda) áreas con tendencia de A2 significativa al 90%, 95% y 99% (positiva- rojo, negativa- azul) superpuestas a Google Earth. b) Tendencia de A2 entre 2002 y 2018 (positiva- rojo, negativa- azul).

CONCLUSIONES

El análisis de tendencia estacional del NDVI, en la zona del valle inferior del río Neuquén, a partir de información del producto MYD13Q y MOD13Q1 cada 16 días, representó claramente las diferencias entre el comportamiento del valle y superficie de la meseta.

Los usos del suelo entre 2002 y 2019, cambiaron en algunos sectores siendo detectados por la resolución espacial del sensor MODIS. El área presentó tendencias de la onda anual positivas, indicando un aumento del NDVI entre 2002 y 2019 en áreas del piso de valle y el pedimento. Las tendencias asociadas a la onda estacional, describieron las variaciones de los estados fenológicos de las zonas productivas. Las tendencias estacionales negativas, se ubicaron especialmente en áreas periurbanas y en la superficie de la meseta, lugares en los cuales se observa claramente el aumento de las actividades relacionadas a la explotación petrolera; con una disminución notoria de la vegetación nativa, lo que redunda en una tendencia negativa del NDVI.

REFERENCIAS

Capua, O., Giordano, A. and Jurio, E. Una problemática ambiental a escala local: el caso del barrio Barda Soleadas. *Boletín Geográfico* 22, 91-107 (2000).

Chiementon, M. E. and Cogliati, M.G. Variaciones del uso del suelo en Cipolletti, provincia de Río Negro, Argentina. *Contribuciones científicas GÆA* 23, 51-60 (2011).

Cogliati, M. G. Estudio preliminar de las áreas de vegetación nativa en el norte de la provincia de Neuquén a través de la aplicación de teledetección. *IX Congreso Argentino de Tecnología Espacial* (2017).

Didan, K. MYD13Q1 MODIS / Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, (2015).

Eastman, J.R, Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H.L, Chen, H., Neeti, N., Cai, Y.M., Machado, E.A & Crema, S.C. 2009. Seasonal trend analysis of image time series, *International Journal of Remote Sensing* 30:10, 2721-2726.

Finessi, F. G. and Groch, D., Dinámica del paisaje agrario de San Patricio del Chañar (Neuquén, Argentina) a través de imágenes satelitales. *Boletín Geográfico* 34, 91-109 (2012).

Guo, L., Wu, S., Zhao, D., Yin, Y., Leng, G. and Zhang, Q. NDVI-Based Vegetation Change in Inner Mongolia from 1982 to 2006.*Advances in Meteorology*, 1-12 (2014).

Mancino, G., Nolè A., Ripullone, F. and Ferrara, A. Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy. *Journal of Biogeosciences and Forestry* 7, 75-84 (2014).

Martinuzzi, S., Gould, W.A., Ramos Gonzalez O.M., Martinez Robles, A., Calle Maldonado, P., Pérez-Buitrago, N. and Fumero Caban, J. Mapping tropical dry forest habitats integrating landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean island of Mona. *Biol Trop* 56 (2), 625-39 (2008).

Neeti, N., Eastman, J.R., 2011. Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS* 15(5):599-611.

Radonich, M., Steimbreger, N. and Ozino Caligaris, M. S. Expansión productiva y espacial de grandes empresas frutícolas de la norpatagonia argentina. *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales* (1999).

Rasuly, A., Naghdifar, R, and Rasoli, M. Detecting of Arasbaran Forest Changes Applying Image Processing Procedures and GIS Techniques. *Procedia Environ. Sciences* 2, 454–464 (2010).

Steimbreger, N., Radonich M. and Bendini M. Expansiones de frontera agrícola y transformaciones territoriales: procesos sociales diferenciales. *Cuaderno GESA* 4, 17-39 (2003).

Wessels, K.J., De Fries, R.S., Dempewolf, J., Anderson, L.O., Hansen, A.J., Powell, S.L., Moran, E.F. 2004. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Ex. Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Para State, Brazil. *Remote Sensing of Environment* 92 67-83.

FACTORES QUE PROPICIARON LAS INUNDACIONES EN LA LOCALIDAD DE LA EMILIA, PARTIDO DE SAN NICOLÁS, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Conesa C.[a], Fucks E. E.[b] y Pisano M. F.[c]

[a] *FCNyM, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, ARGENTINA*
[b] *CEIDE-IAMRA, FCNyM y AyF, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, ARGENTINA*
[c] *CEIDE-IAMRA, FCNyM y AyF, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, ARGENTINA*

e-mail: ccgeologia@gmail.com

RESUMEN

Si bien las inundaciones constituyen una problemática recurrente en numerosas localidades de la región pampeana, sobre todo en aquellas situadas en los márgenes de algún curso de agua, el aumento de la población y de sus bienes, han indudablemente agregado gravedad a un riesgo ambiental previo. Desde sus comienzos, en 1980, el asentamiento que algún día constituiría la localidad de La Emilia, ubicado sobre la planicie de inundación de arroyo del Medio, sector que integra un antiguo bajo geomorfológico, fue invadido por el agua por lo menos una docena de veces. La cuenca de drenaje del arroyo del Medio posee una muy buena integración, con un cauce principal bien definido, pero se vio modificado innumerables veces por distintas obras, lo que llevó a un desequilibrio en la energía del mismo. Se ve sobrepasado en épocas de intensas lluvias, cuando la saturación del suelo es total y el escurrimiento se ve impedido. La Emilia cuenta con distintas obras de protección, como canales de desagote en los campos aledaños y terraplenes de tosca y tierra en las inmediaciones. La ciudad en sí cuenta con una protección en forma de herradura, de tosca y tierra apisonada, que la rodea desde 2010, pero que demostró ser contraproducente en 2017, cuando las aguas inundaron la ciudad nuevamente, y a falta de exclusas no pudieron seguir su curso natural. En este trabajo analizaremos cuales son los factores que propician las inundaciones en esta localidad, tanto naturales como humanos, y las obras que intentan mitigarlas.

Palabras clave: Arroyo del Medio, inundaciones, terraplén.

INTRODUCCIÓN

Los riesgos naturales son definidos como "*la probabilidad de que un territorio y su población asociada se vean afectados por episodios naturales de rango extraordinario*"; siendo la amenaza o peligro natural "*la probabilidad respecto a que se produzca un determinado fenómeno natural de una cierta extensión, intensidad y duración, con potencialidad tal que pueda causar daños a personas (amenaza) o al entorno (peligro natural)".* Por su importancia, se ha tomado el concepto de Vich *et al.* (2010) como punto de partida del presente trabajo, para analizar tanto el riesgo a inundación, y los factores que la propician, como las remediaciones y mitigaciones que se llevaron a cabo en la zona.

Para el estudio específico de las amenazas se ha tomado como base el documento de Van Westen (1993) y de la UNESCO (1972), donde a las mismas se las clasifican de

acuerdo a cuatro criterios, según origen, su vinculación con sus factores desencadenantes, duración e impacto y frecuencia.
Respecto al origen natural de la amenaza, en la zona de estudio se destacan las amenazas geológicas e hidrometeorológicas. Las originadas por la sola acción del hombre se encuentran comprendidas por las actividades antrópicas como la construcción de obras ingenieriles transversales al curso del arroyo, tales como puentes ferroviarios y viales, contenciones laterales, tajamares y diques, canalizaciones y dragados. En cuanto al origen combinado, se incluyen aquellas amenazas producidas por las actividades del hombre que son magnificadas por características del sistema natural en el que se desarrollan. Tal es el caso de la erosión retrocedente, producida por la canalización de cursos de manera antrópica para su aprovechamiento, lo cual produce una erosión que no es la natural del sistema, constatado por la existencia de numerosas cascadas y saltos en el último tramo del arroyo, inusitado para un curso de poca pendiente como este.
Estos factores, individuales y/o combinados, produjeron en varias ocasiones a lo largo de la historia, inundaciones en prácticamente todo el casco urbano de La Emilia, dejando miles de evacuados en cada ocasión, causando daños materiales y perdida de la vida.

UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La Emilia es una localidad perteneciente al partido de San Nicolás, en el extremo noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se encuentra a orillas del arroyo del Medio, límite geográfico con la provincia de Santa Fe. La cuenca del arroyo del Medio limita hacia el noroeste con la cuenca del arroyo Pavón y hacia el sureste con la cuenca del arroyo Ramallo, todos afluentes del río Paraná. Su cabecera se encuentra en las inmediaciones de la localidad de Juncal, Santa Fe, y linda hidrológicamente con el bañado homónimo, cabecera del arroyo Pergamino. Su trazado sobre los sedimentos cuaternarios lo lleva a desembocar en el delta del río Paraná a pocos kilómetros del centro cívico de San Nicolás. La fisonomía de la región, caracterizada por suaves lomadas de composición loessica, y marcadas por una red hidrográfica bien integrada, ha signado a la región con el nombre de “Pampa Ondulada” (Daus, 1946).

GEOLOGÍA REGIONAL

Los sedimentos que constituyen las primeras decenas de metros están representados por loess con diferentes características y edades, especialmente afectados por la tectónica cuaternaria (Castellanos, 1966). La neotectónica actuó, y sigue actuando, no sólo a nivel de los grandes bloques subcontinentales, como el bloque de San Guillermo, sino que también dentro de ellos, reactivando fallas de menor jerarquía paralelas o subparalelas a las geofracturas. Esto genera pilares, semi-horsts y fosas tectónicas de forma alargada en las direcciones seguidas por estas. Los lineamientos paralelos o subparalelos a la geofractura, y en cierto grado sus conjugados, ver figura 1, fueron trazados tomando en consideración varios rasgos observables, como son bordes entre áreas inundables y áreas bien drenadas, cambio abrupto y continuado de ancho de las llanuras de inundación de los arroyos, encajonamiento, cambio de patrón, quiebres y direcciones anómalas de los cauces, como así también rápidos y cascadas (Racca, 2010)

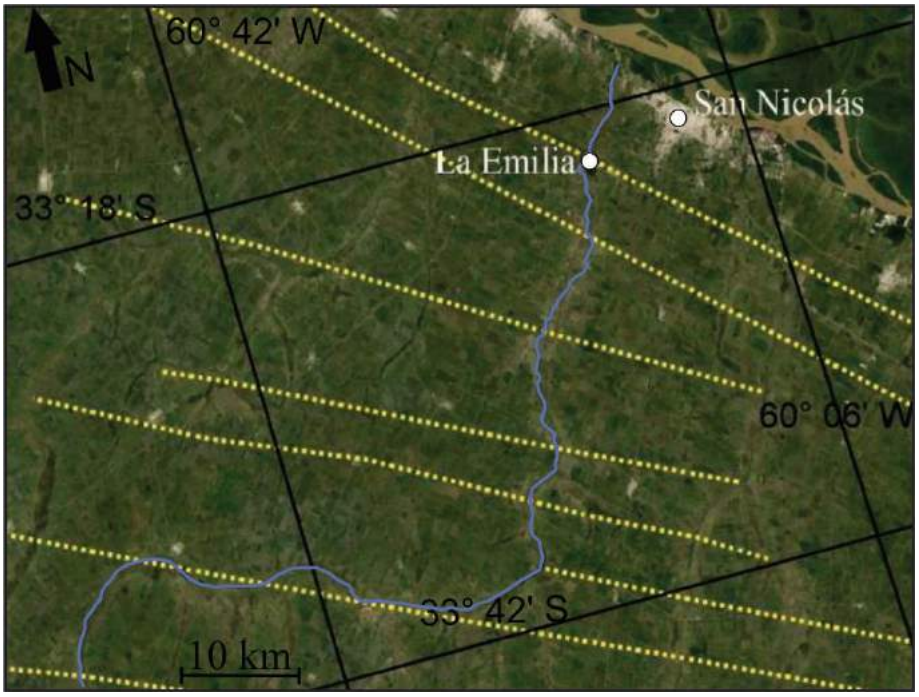


Figura 1. Lineamientos subparalelos en la zona de estudio y trazado del curso principal del arroyo del Medio. Modificado de Racca (2010)

GEOLOGÍA LOCAL

La litología dominante en la región pampeana está conformada en sus primeros 50 metros por sedimentos continentales, agrupados en la Fm. Pampeano (González Bonorino, 1965), Formaciones Ensenada y Buenos Aires (Riggi et al., 1986) o Formación Tezanos Pinto (Iriondo, 1980). Constituyen el sustrato sobre el cual se desarrolla la cuenca de drenaje del arroyo del Medio, ver figura 2a.

Está esencialmente constituida por limos de color pardo más o menos grisáceo, con altos niveles de carbonato de calcio, tanto en concreciones radiciformes y botroidales, en la masa limosa del suelo, como en capas a diferentes alturas dentro del perfil, cuyo origen se asocia al desplazamiento sucesivo del nivel freático. Estas capas de tosca producen superficies difíciles de erosionar para el arroyo, específicamente en su parte media-terminal, generando rápidos y pequeñas cascadas. Dataciones absolutas por la técnica de termoluminiscencia arrojaron como edades máximas 35.890 ± 1030 años A.P. (antes del presente), (Krohling, 1999), mientras que Toledo (2011) le asigna una edad mayor a 600 ka A.P.

La Formación La Postrera (Fidalgo y Martínez, 1995) remata las secuencias con sedimentos limo-arenosos a arenas limosas de color castaño claro a amarillo rojizo, con un aspecto masivo y friable, salvo en los sectores edafizados, con espesores que llegan hasta los 2 metros. Corresponde a depósitos eólicos, generados aparentemente por diferentes pulsos depositacionales, evidenciados por perfiles de meteorización interpuestos en sus depósitos (Fidalgo y Martínez, 1995).

Sobre estas, se depositan en discordancia los depósitos fluviales de la Formación Luján, ver figura 2b, representados en los perfiles del arroyo del Medio, compuestas por facies limo areno-arcillosas, producto del retrabajo de las formaciones antes mencionadas, cuyo desarrollo y características son muy variables (Fucks et al., 2015).



Figura 2. Componentes litológicos principales de la cuenca **a.** Depósitos loessoides aflorando en una cantera **b.** Depósitos fluviales asignados a la Fm. Luján.

CLIMA

El clima de la región es subtropical húmedo, *Cfa* según la clasificación de Köppen (Thornthwaite, 1943). Presenta temperaturas medias anuales que oscilan entre 15 y 16,5 Cº, con mínimas y máximas moderadas. Si bien La Emilia no cuenta con una estación de monitoreo climático, se encuentra equidistante a tres estaciones, con variaciones mínimas, de las cuales Junín Aero (en Pergamino, Buenos Aires) representa, por cercanía a la cabecera de la cuenca los datos utilizados. El valor promedio de precipitaciones anuales es de 1.043 mm, siendo los meses más lluviosos de octubre a abril, cuyo promedio total asciende a 727,8 mm, es decir el 69,7% del total anual (SMN, Junín Aero 1981-2010)

Si en vez de analizar los promedios de precipitación para el rango de 1981-2010, que provee el Servicio Meteorológico Nacional, lo hacemos con la base de datos del Banco Mundial (World Bank), analizamos datos de lluvias desde 1901 a 2016, separados por treintenas. Como podemos observar, ver figura 3, los meses más lluviosos son marzo y enero respectivamente. En los 115 años que abarca la recolección de datos en la cuenca del arroyo del Medio, las lluvias de marzo aumentan un 136%, y las de enero 147,5%, cuyos aumentos principales están marcados entre la primera y la segunda treintena. Los meses menos lluviosos también presentan aumentos, aunque leves, en el periodo 1901-1990, pero para los últimos 30 años, el volumen de las precipitaciones disminuye respecto a años anteriores.

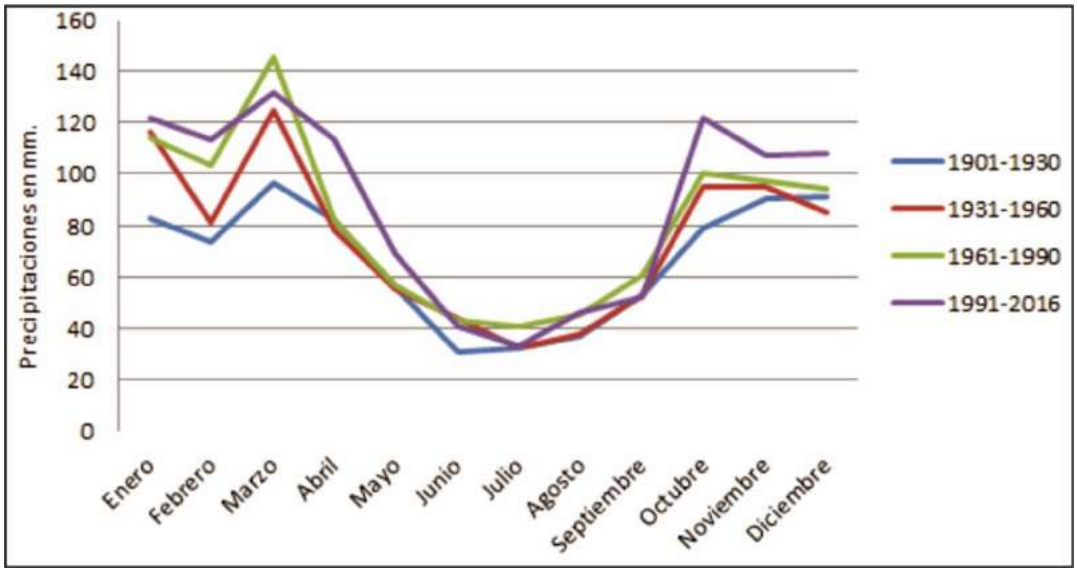


Figura 3. Promedio de precipitaciones mensuales, separado cada 30 años, para la cuenca del arroyo del Medio. Datos recolectados del Banco Mundial de Datos.

GEOMORFOLOGÍA

La cuenca del arroyo del Medio abarca un área aproximada de 1.200 km^2, con un estimado de más de 120 km de recorrido, que a fines prácticos dividiremos en 4 secciones: cabecera, medio, terminal y deltaico. Esta división no es aleatoria, sino que se basa en quiebres muy pronunciados en el cauce del arroyo.

El sector de cabecera se desarrolla en la divisoria de aguas con la cuenca del río Arrecifes, a partir de depresiones aisladas unidas por canalizaciones en ambientes de casi nulo drenaje, en las cercanías de Juncal (Provincia de Santa Fe). El arroyo discurre en dirección SO-NE casi 15 km, y a partir de la localidad de Peyrano, cambia de rumbo abruptamente hacia el SE. Presenta un diseño rectangular, con tributarios, en la margen izquierda, paralelos al primer tramo del cauce, y entre sí, y casi tan largos como éste. En la margen derecha los tributarios son más difusos y cortos, menos marcados y más anegados, con un ángulo de inserción al cauce principal más agudo, ver figura 4. Presenta una planicie de inundación irregular que llega a alcanzar 1,5 km de ancho, con una diferencia de altura de solo 3 m entre ésta y los campos cultivados en los alrededores. La poca altimetría en este tramo produce, en épocas de grandes lluvias, la ocupación por parte del agua, representada en ocasiones por cuencas de deflación con remanentes de lagunas y paleo cauces, tanto en la planicie como en los campos.

El tramo medio del arroyo comienza a la altura de la localidad de Guerrico con otro quiebre a 90°, volviendo su rumbo SO-NE, con diseño sinuoso a meandroso, trubutarios insertados en angulos de aproximadamente 45° y una planicie de inundación que duplica a la del tramo anterior, con depósitos fluviales en discordancia sobre los sedimentos pampeanos. La Autoridad del Agua (ADA), posee dos estaciones hidrométricas en este tramo del arroyo del Medio, con mediciones de una altura promedio de 7.15 metros y un caudal promedio de 2,9 m3/s (A.D.A, 2005, 2009)

El tramo terminal del arroyo del Medio, considerado entre La Emilia y la barranca del río Paraná presenta un cauce definido y profundo de 40 metros de ancho. En este sector, la mano del hombre ha moldeado el cauce del arroyo, con distintas obras y dragados, afectando la naturaleza del mismo.

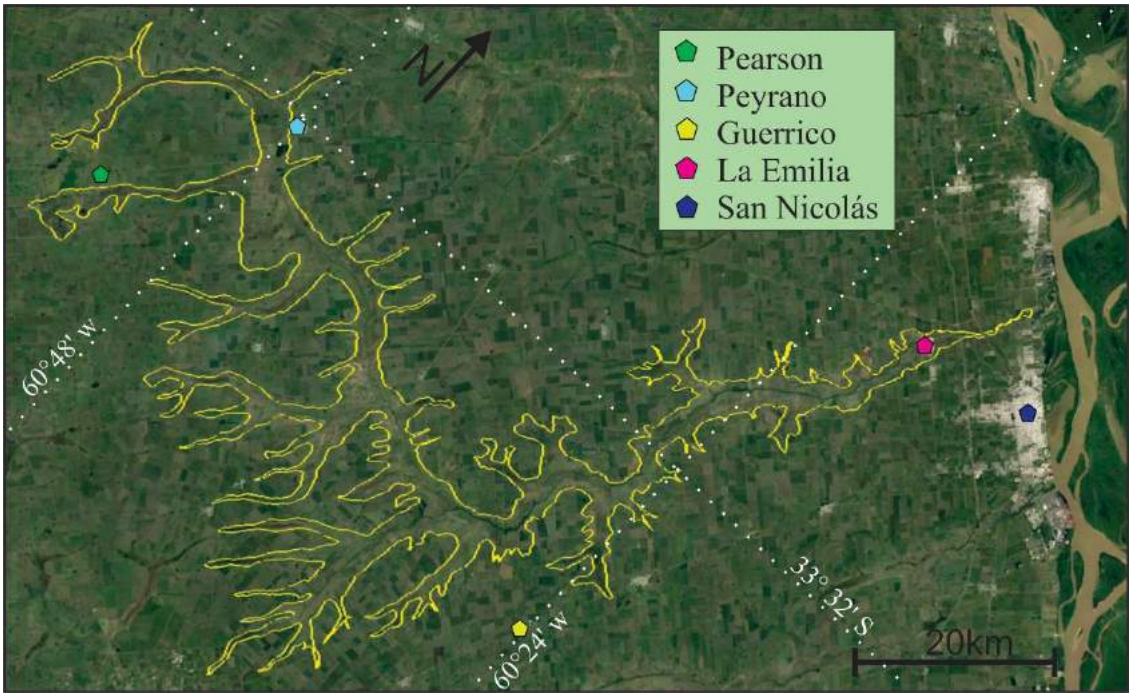


Figura 4. Planicie de inundación del arroyo del Medio, en amarillo, y localidades mencionadas.

Entre ellas, la Ruta Nacional 9, el puente del Ferrocarril Buenos Aires - Rosario (1914), el dique del frigorífico "La Elisa" (que encausaba parte del agua del arroyo por un canal paralelo a este, de por lo menos 1,5 km, 1930), además de los caminos previos que vinculan la región y las obras específicas en La Emilia, expuestas más adelante.

El lecho del presenta niveles de tosca de la Fm. Pampeano, que generan rápidos y pequeñas cascadas, que junto a las cuantiosas marmitas en la planicie de inundación, evidencian el poder erosivo del arroyo en este tramo. El rasgo de erosión más consistente está representado por una cascada, que en el transcurso de 15 años avanzó alrededor 300 metros aguas arriba, producto de la erosión retrocedente, ver figura 5. Aguas bajo de ésta, el arroyo se ensancha, pierde energía y el agua queda acotada al cauce, inclusive durante las crecidas. Presenta paredes verticales de hasta 10 metros de alto, erodadas en la Formación Pampeano, sin rápidos ni planicie de inundación

En la transición al ambiente deltaico del río Paraná, el arroyo vuelve a tener una dinámica depositacional, conformando una amplia planicie de inundación, de unos 40 metros de ancho a cada lado, y de pendiente menor al 1%, con depósitos fluviales de arena media a fina, gris castaña a gris oscura, suelta, sin estructura reconocible, más que una leve estructuración en bloques en su parte cuspidal.

Al cruzar la barranca holocena del río Paraná, el arroyo del medio en ambiente deltaico, llamado arroyo Yaguarón, discurre entre sedimentos generados durante la transgresión holocena y aquellos correspondientes a procesos del delta paranaense actual. Su diseño se vuelve meandroso, cambia su rumbo SO-NE, predominante de los últimos casi 40 km, a casi completamente S-N. Luego de 3 km toma la dirección contraria y discurre paralelo al río Paraná por unos 13 km, en direccion NNO-SSE, separado de éste por una barrera isla de gran porte, y confluyendo finalmente con él a la altura de la ciudad de San Nicolás, ver figura 6. Este cambio de dirección, primero hacia el norte y luego al sudoeste, refleja la influencia de la ingresión holocena en el área, su deriva costera hacia el NO, su posterior retirada y el avance del delta hasta su posición actual.

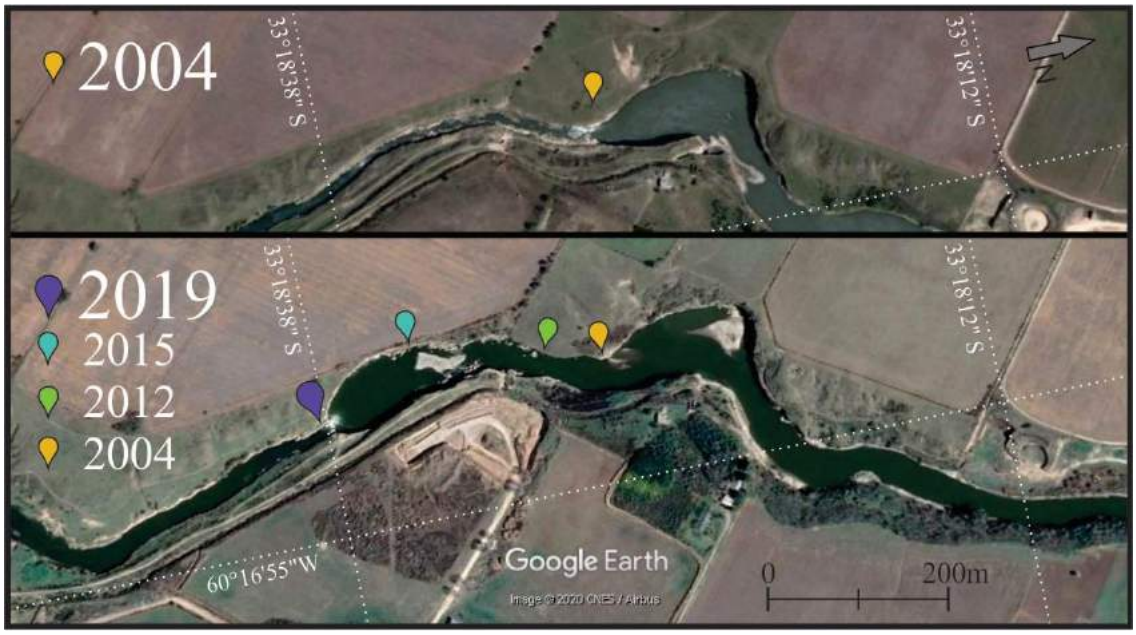


Figura 5. Retroceso del salto del arroyo del Medio. El canal del frigorífico La Elisa es visible en la margen derecha del arroyo, cuyas paredes fueron desgastadas por la erosión retrocedente del salto.

Evidentemente, estos cambios en las condiciones geomorfológicas del curso (erosivas y acumulativas) están asociadas a los cambios de nivel de base que el río Paraná produce en todos sus afluentes, propiciados por las fluctuaciones del nivel del mar (Fucks 2005) y la neotectónica de la región (Castellanos, 1966), como responsables primarios de la dinámica de los cursos de agua de esta zona.



Figura 6. En celeste el arroyo del Medio en su último tramo continental, en rojo la barranca holocena y en amarillo el arroyo Yaguarón.

LA EMILIA

La fábrica La Emilia Industrias Textiles S.A. y el caserío de los trabajadores, constituyen el germen de esta localidad, construida a orillas del arroyo del Medio en 1890, aunque, cuando fue designado pueblo en 1943, su plaza central fue ubicada a 700 m del cauce del arroyo, configurando en la actualidad un parcelamiento poligonal de 1,5 por 0,5 km con su eje mayor transversal al escurrimiento del arroyo. Geomorfológicamente está ubicada en la parte final del tramo medio del arroyo, donde

el escurrimiento de agua es lento, con pendientes menores a 0.1%. Gran parte de la localidad de La Emilia está a 2,5 metros de altura por encima de la barranca del arroyo, dentro de su planicie de inundación. Además, las pendientes son desiguales, lo que hace que el agua drene más rápidamente desde la margen izquierda que desde la derecha, más extensa y de menor pendiente, donde se ubica La Emilia.
Los sedimentos fluviales en este tramo del arroyo presentan un espesor aproximado de 1,5 m de reciente formación; presenta restos de invertebrados de agua dulce, como *Corbicula fluminea* (Müller, 1774), que fueron introducidos en la región en los últimos siglos, además de elementos antrópicos (alambrados, ladrillos, entre otros), indicando un cambio muy reciente de la dinámica del arroyo.

INUNDACIONES

En la región pampeana en general y la provincia de Buenos Aires en particular, la presencia de eventos hidrológicos extremos, tanto sequías como inundaciones, de diversa severidad, constituyen un elemento insoslayable de su historia y su presente (Ameghino 1884; Moncaut 2001; Deschamps et al. 2003; Scarpati y Capriolo, 2013).
Desde los comienzos del poblado Emiliano, diversos eventos hidrológicos afectaron al mismo. En 1908, la primera inundación de la que se tiene registro, destruye el dique que formaba el tajamar que proveía de energía eléctrica a la planta textil, construyéndose uno nuevo a unos pocos metros aguas arriba. En 1939 ocurre un evento similar y hacia fines de 1963 y comienzos de 1964 nuevamente las aguas desbordan el arroyo inundando sus calles y pasando con soltura por encima de la ruta que los conecta con San Nicolás. La planta baja del establecimiento textil se ve totalmente anegada de agua, causando cuantiosas pérdidas de materias primas y productos elaborados. En mayo de 1966 se produjeron abundantes precipitaciones que llevaron a un anegamiento del terreno por saturación de agua en el suelo y formación de lagunas en los alrededores del poblado. En esta ocasión, 450 mm de lluvia generaron alturas del nivel de agua de entre 1.20 a 2 metros en gran parte del poblado, principalmente dentro del establecimiento textil. Esta fue la mayor inundación registrada hasta el momento por la localidad. En 1978 el evento vuelve a repetirse, al ser invadido el pueblo por fuertes correntadas. La fábrica textil, afectada por estos sucesivos eventos meteorológicos, sumados a las políticas económicas del país, se presenta a quiebra.
Ante las constantes crecidas del arroyo, entre fines de 1980 y comienzos de 1981, se formó, entre los mismos emilianos, la comisión *"Prodefensa de inundaciones"*, contando con apoyo del intendente del partido de San Nicolás y las autoridades de la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Buenos Aires. Se construyó un terraplén contiguo a un canal aliviador en el campo del Señor Oscar Cingolani, ubicado adyacente a la Emilia en dirección a Ruta Nacional 9, aguas abajo del pueblo. Dicho canal descarga el agua de un curso intermitente que discurre paralelo al arroyo aguas arriba por kilómetros. Asimismo, se trabajó ensanchando el recodo del arroyo por detrás la fábrica textil, y quitando vegetación para un mejor paso del agua, y se elevó un terraplén de tierra contra la misma.
En octubre de 2001 se conformó un grupo de trabajo llamado *"Obras del arroyo del Medio"*, con la finalidad de encontrar una solución para la amenaza de las inundaciones. Bajo la presión de esta comisión, y luego de crecidas del arroyo ese mismo mes, la Municipalidad de San Nicolás elevó un metro más el terraplén detrás de la antigua Fábrica Textil, desde unos años atrás convertida en una planta de fabricación de motocicletas, Motomel. Se ensanchó el cauce del arroyo del Medio por debajo de la

Ruta Nacional 9 (2,5 km aguas abajo del pueblo) y se finalizó un canal aliviador en el molino Santa Clara, a la altura de San Nicolás.
En el año 2010, por primera vez en la historia, un primer terraplén de tosca y tierra rodeó al casco urbano, protegiéndolo casi íntegramente. Contornea al pueblo en forma de herradura, siendo el lado abierto el SE, contrario al arroyo. Mide aproximadamente 8 km con una altura de entre 6 y 3 m, que en sectores fue rebajado paulatinamente por el paso de animales. Complementa la obra un recubrimiento de cemento por detrás de la planta de Motomel, que distorsionó en gran medida la barra natural en la curva del arroyo.
El 17 de enero de 2017, el agua sobrepasó el terraplén de tosca y tierra e inundó La Emilia. Tres grandes tormentas precedieron la tragedia, que entre el 25 de diciembre de 2016 y el 2 y 15 de enero de 2017, sumaron 740 mm de agua en la cuenca. El terraplén cedió por tres puntos, cubriendo de agua 40 manzanas del pueblo, con un promedio de 150 cm de altura, provocando un muerto y más de 4.000 evacuados. Los vecinos indignados culpan al terraplén, que sin el apropiado funcionamiento de esclusas convirtió al pueblo en "una pileta" (Perfil, 2017). En el mismo orden, también fue culpado, en este y otros casos, el sector agrícola-ganadero por la realización de canalizaciones clandestinas con el fin de drenar de los campos el agua excedente.
Luego de este episodio, el terraplén fue levantado 50 cm y recubierto por hormigón en el sector que separa al poblado del arroyo. En la Figura 7 podemos observar la ubicación de las distintas obras públicas realizadas en La Emilia, desde el tajamar original que abasteció de energía eléctrica a la Emilia I.T.S.A., el terraplén de 1981 detrás del polo industrial, hasta el refuerzo de hormigón construido luego de la última inundación.
Estos son solo ejemplos de las inundaciones que ha sufrido la localidad de La Emilia, estimándose un total de 12 crecidas en los últimos 120 años, aproximadamente una inundación cada 10 años (Ricardo Primo, 2007).



Figura 7. Ubicación espacial de las distintas obras públicas a lo largo de los años.

DISCUSIÓN

Si bien las inundaciones constituyen una problemática recurrente en numerosas localidades de la región pampeana, sobre todo en aquellas situadas en los márgenes de algún curso de agua, como La Emilia, el aumento de la población y de sus bienes, han indudablemente agregado gravedad a un riesgo ambiental previo.

Según el origen de la amenaza, los factores que más responsabilidad tienen en estos eventos están relacionados a aspectos naturales y en menor medida aquellos relacionados con el hombre, donde la planificación y el ordenamiento del territorio constituyen el punto de partida. Los aspectos naturales y de difícil resolución se asocian a los excesos de agua y las condiciones geomorfológicas locales y regionales, a las que se le suman las obras realizadas por el hombre, ya sean aquellas en el sector mismo, como otras de alcance más regional.

Precipitaciones y saturación del suelo: La región recibe aproximadamente unos 1.000 mm al año distribuidos irregularmente, lo que no produce inconvenientes y permite las actividades agrícolas ganaderas sin necesidad de riego, considerándose una de las zonas más productivas del país. Sin embargo, cuando la intensidad de las precipitaciones es excesiva, impidiendo a los cauces su evacuación, las aguas desbordan ocupando la planicie de inundación, situación acentuada en los últimos 100 años en los meses lluviosos.

A pesar de esto, muchas veces, sin que las precipitaciones sean extraordinarias, los excesos de agua en el suelo pueden colmatar la capacidad de almacenaje del mismo, propiciando su escurrimiento superficial hacia las depresiones naturales del terreno o hacia la red hidrográfica de la región, aumentando el caudal.

El fenómeno de El Niño - Oscilación Sur (ENOS) es un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical. Cuando este fenómeno se desarrolla afecta con cuantiosas lluvias cerca de 20.000.000 de hectáreas en la región litoral de la Argentina (Ligier et al. 1998), aunque también se dan eventos extremos en periodos neutrales y de la niña (Kurtz, et al. 2015). La inundación a comienzos de 1966 coincide con un fenómeno de El Niño muy fuerte. (GGW, 2020)

Ubicación geomorfológica de La Emilia: La Emilia se encuentra sobre la margen derecha del arroyo del Medio, dentro de su planicie de inundación más amplia, ámbito ocupado naturalmente por los desbordes de agua en momento de excesos hídricos. Esta situación produce que las aguas de escorrentía al llegar al lugar pierdan velocidad y ocupen toda la depresión. Además de esto, la curva a 90 grados antes del pueblo produce una disminución de la velocidad, evidenciado por la presencia de una isla, fruto de la pérdida de energía y consecuente depositación, generando su desborde directamente en el poblado.

Obras civiles: Si bien aguas abajo existen diversas obras realizadas transversalmente al curso que pueden influir en el escurrimiento del agua, la construcción del tajamar inmediatamente aguas arriba del pueblo, es la de mayor influencia en el flujo del arroyo, ver figura 8. Esta obra limita el escurrimiento libre, a lo que se le suma la curva abrupta del arroyo, provocando el desborde del mismo.

Si bien la edificación de una protección perimetral del pueblo es eficiente y muy común en localidades ubicadas en similares situaciones geomorfológicas, en La Emilia constituye una trampa para la salida del agua que solo fue posible sacar en 2017 por medio de bombeo.



Fig. 8. a. Puente ferroviario. **b.** Dique de captación de agua del frigorífico La Elisa **c.** Tajamar en el recodo del arroyo detrás de La Emilia. **d.** Murallón de hormigón entre el arroyo del Medio y La Emilia

CONCLUSIONES

Desde el primer momento, el asentamiento que algún día constituiría la localidad de La Emilia, se ve amenazado por inminentes inundaciones, puesto que estaba ubicado sobre la planicie de inundación del arroyo del Medio, sector que integra parte de un antiguo bajo geomorfológico. Cuenta además con la desventaja de que el cauce produce un cambio de dirección abrupto en este sector, lo que genera una lentificación del escurrimiento encausado, y por ende, la salida de las aguas del cauce en épocas de crecidas. Este recodo, que contaba con un salto de agua natural, es justamente la razón del asentamiento.

Si bien la cuenca de drenaje tiene una muy buena integración, con un cauce principal bien definido, se ve sobrepasado en épocas de grandes lluvias, cuando la intensidad de las precipitaciones genera las condiciones para que el canal no pueda contener el agua y comience a desbordar, alcanzando alturas variables. La saturación del suelo, por precipitaciones normales a lo largo del periodo lluvioso del año, puede imposibilitar la infiltración del agua, generando un escurrimiento superficial que ocasiona un aumento del caudal en el cauce principal. No obstante, en casos de crecidas, la intensidad de las precipitaciones escapa de los valores medios.

Por otro lado, la presencia de diferentes obras en el último tramo del arroyo, ya sea dificultando o impidiendo el escurrimiento del agua, son responsables de las inundaciones. Si bien la Ruta Nacional 9 y el ferrocarril representan una barrera, el principal problema fue la construcción del tajamar, a comienzos del siglo pasado, para el suministro de energía de la planta textil. Este se encuentra en el recodo del arroyo, donde una barra ocupa el medio del cauce, es decir, quitándole al arroyo más de la mitad de su ancho de cauce. Esta barra que evidencia la perdida de energía en este sector del arroyo, se vio modificada sustancialmente a través de los años, con la ayuda de los dragados, desmalezamientos y los murallones de contención. Además, la disposición de la ciudad también afecta al escurrimiento superficial del agua en la planicie de inundación, ya que su eje principal es transversal a la dirección de flujo.

Por último, La Emilia cuenta con distintas obras de protección, como canales de desagote en los campos aledaños y terraplenes de tosca y tierra en las inmediaciones. La ciudad en sí cuenta con una protección que la rodea parcialmente desde 2010, que demostró en 2017 que es más un perjuicio que una ayuda, y que al momento de la inundación, carecía de esclusas de vaciado y suficientes estaciones de bombeo para remover el agua que ingresó al pueblo. Luego de este episodio el terraplén fue reforzado y elevado con hormigón, solamente en un sector de pocas cuadras de largo, separando a los pobladores del arroyo.

REFERENCIAS

Ameghino, F. Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no de desagüe. Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, (1884).

Autoridad del Agua. Mediciones en estación hidrométrica HE 4000, Arroyo del Medio (Conesa-Molina). 26/04/2005

Autoridad del Agua. Mediciones en estación hidrométrica HE 4005, Arroyo del Medio (La Emilia). 18/03/2009

Castellanos, A. Estratigrafía y génesis de los valles fluviales en los bloques tectónicos pampeanos: la vida orgánica a través de los últimos tiempos geológicos en cada uno de los bloques. *Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Instituto de Fisiografía y Geología*, Vol. 4. (1973).

Daus, F. Morfografía general de las llanuras argentinas. *GÆA Geografía de la República Argentina*. Tomo III: 115-198 (1946).

Deschamps, J.R., Otero, O., Tonni, E.P. Cambio climático en la pampa bonaerense: las precipitaciones desde los siglos XVIII al XX. Documento de Trabajo N° 109, Universidad de Belgrano. En: http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/109_deschamps.pdf (2003).

Fidalgo, F., Martínez, O. El perfil de meteorización en unidades estratigráficas superficiales de la pampa Ondulada. Provincia de Buenos Aires. *4° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses*, Actas 1: 187-194. (1995).

Fucks, E.E. Estratigrafía y Geomorfología en el ámbito del curso inferior del Río Luján, Provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata*. (2005).

González Bonorino, F., Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico. Revista de la Asociación Geológica Argentina 20(1): 67-150. (1965).

Golden Gate Weather Services El Niño and La Niña Years and Intensities: Based on Oceanic Niño Index (ONI).California, EU. Disponible en: https://ggweather.com/enso/oni.htm(2020)

Iriondo, M., Esquema evolutivo del delta del Paraná durante el Holoceno. *Actas Simposio sobre problemas geológicos del Litoral Atlántico Bonaerense*, 74-88. (1980, Marzo).

Kröhling, D.M. Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa, Argentina. *Quaternary International*. 62 (1): 49-55. (1999).

Kurtz, D. B., Perucca, A. R., Ybarra, D. D., Fernández López, C., Rey Montoya, S., Barrios, R. El fenómeno del Niño. Comparación de superficies afectadas por excesos hídricos en Corrientes. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/fenomeno_el_nino_2015-2016-1.pdf. (2015).

Ligier, H.D., Zurita, J.J., Pilatti, O. Recomendaciones para suelos sometidos a excesos de agua en el NEA. *SAGPyA – INTA.* . (1998)

Moncaut C.A. (Maiola O.C., N.A. Gabellone, M.A. Hernández editores). Inundaciones y sequías tienen raíces añejas en la pampa bonaerense (1576-2001) Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (2003)

Perfil La Emilia bajo el agua. *Diario Perfil*. Disponible en https://www.perfil.com/noticias/sociedad/los-vecinos-de-la-emilia-se-sienten-abandonados.phtml (17/01/2017).

Primo, R. D. *Historia de la Emilia - Libro de la memoria Emiliana*. San Nicolás, Argentina. Fondo Editorial de San Nicolás. (1992*)*.

Primo, R. D. *Libro blanco y negro. Ayer y hoy - Historia de La Emilia*. San Nicolás, Argentina. Ediciones del Autor. (2007).

Racca, J. M. G. Geomorfología de la Cuenca del arroyo del Medio. *Instituto de Fisiografía y Geología*, 72-75. (2010)

Riggi, J., Fidalgo, F., Martínez, O. y Porro, N. Geología de los "Sedimentos Pampeanos" en el partido de La Plata. *Revista Asociación Geológica Argentina* 41 (3-4): 316-333. (1986).

Scarpati, O.E., Capriolo, A.D. Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía*, (82): 38-51. (2013).

Servicio Meteorológico Nacional. Valores Medios de Temperatura y Precipitación. Estación Meteorológica Junín Aero, Pergamino, Buenos Aires, Argentina. (1981-2010).

Thornthwaite, C. W. Problems in the classification of climates. Geographical *Review*, 33(2): 233-255. (1943).

Toledo, M.J. El Legado Lujanense de Ameghino: Revisión estratigráfica de los depósitos Pleistocenos-Holocenos del valle del río Luján en su sección tipo. Registro paleoclimático en la Pampa de los estadios OIS 4 a OIS 1. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68 (1): 121–167. (2011).

Unesco. General Conference. *Convención Sobre la Protección Del Patrimonio Munidal, Cultural Y Natural*. Unesco. (1972).

Van Westen, C.J. Sistemas de teledetección e información geográfica para la mitigación de riesgos geológicos. *ITC journal*, (4): 393-399. (1993).

Vich, A.I.J., Gudiño, M.E. Amenazas naturales de origen hídrico en el centro-oeste árido de Argentina: diagnóstico y estrategia para su mitigación y control en el Gran San Juan y Gran Mendoza. *Editorial Fundación Universidad Nacional de San Juan*. (2010).

TÉCNICA DE INTERROGACIÓN NEUTRÓNICA PARA LA DETECCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS EN CONTENEDORES PORTUARIOS

D´Amico N. M. B. [abc], Mayer R. E. [abc]

[a]*Departamento Física de Neutrones, CAB, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA*
[b]*Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[c]*Instituo Balseiro, CNEA, ARGENTINA*

e-mail: ndamico@unrn.edu.ar

RESUMEN

La detección de sustancias químicas de carácter peligroso, utilizando la radiación como técnica no intrusiva, se considera una herramienta posiblemente favorable para identificar compuestos ocultos en cargamentos. Para ello y restringiendo el objetivo al sólo efecto de desarrollar una metodología de investigación de la presencia de sustancias de interés, se someterá a prueba un número limitado de sustancias tóxicas y de elevado riesgo ambiental, con el objeto de probar la posible viabilidad de una técnica de detección en cantidades no inferiores al rango del kilogramo. La técnica de detección neutrónica se aplicará para el escaneo de grandes contenedores aduaneros en caso de presentarse alguna duda con los resultados obtenidos luego de realizar un escaneo con radiación X. El interés de identificar la presencia de sustancias tales como cadmio, cloro, mercurio y cromo se debe a las restricciones establecidas por la normativa local e internacional y debido a los numerosos antecedentes de impactos ambientales negativos producto de la incorrecta gestión de las mismas y causantes de innumerables casos de morbilidad y mortalidad en seres humanos. Se han utilizado diferentes estrategias, a escala laboratorio, a fin de desarrollar una prescripción o metodología que permita identificar estas sustancias en situaciones desfavorables. Los procedimientos de detección neutrónica aplicados buscan generar metodologías que permitan realizar escaneos de porciones del contenedor en tiempos breves de 5 minutos aproximadamente, a fin de obtener una pronta respuesta. El presente trabajo de investigación permite otorgar estrategias que fortalezcan la implementación de herramientas de confirmación para el control transfronterizo de sustancias químicas a fin de evitar el riesgo de contaminación ambiental.

Palabras Clave: Detección. Tóxico. Interrogación. Neutrónica.

INTRODUCCIÓN

La detección de sustancias químicas de carácter peligroso, utilizando la radiación como técnica no intrusiva, se considera una herramienta altamente favorable para identificar compuestos ocultos en cargamentos. En una aplicación real, se realizará en primera instancia el escaneo con rayos X y en caso de presentarse alguna duda con los resultados obtenidos, se realizará el escaneo con neutrones en diferentes rangos de energías. La técnica de detección gamma por absorción de neutrones (PGNAA) es no destructiva y permite realizar análisis multielemental en forma cuali y cuantitativa. Dicha técnica se basa en la reacción nuclear (n,γ) de captura de un neutrón por parte de un núcleo atómico y la emisión posterior de uno o más fotones de alta energía. Las muestras absorben los neutrones incidentes de acuerdo a sus respectivas secciones

eficaces, produciendo gamma prompt y de temprano decaimiento a pesar de que tengan períodos de semidesintegración apreciables. Dado que los tiempos de escaneo deben ser breves, no podrán medirse las radiaciones gamma de largos tiempos de decaimiento. Basado en la información reunida, se deberá identificar los elementos químicos susceptibles de ser detectados por interrogación no intrusiva de la mercancía. En caso afirmativo, se deberá prestar atención a las proporciones de tales elementos químicos para determinar si sería posible diferenciar las sustancias de interés de aquellas de transporte lícito. Por consiguiente, se desea contribuir al control del movimiento transfronterizo de sustancias químicas de carácter peligroso dado que, la incorrecta gestión de las mismas, generan un potencial impacto negativo en la naturaleza y por consiguiente, en la salud de los seres humanos. Para ello, se someterá a prueba un número limitado de sustancias de interés, con el objeto de probar la posible viabilidad de una técnica de detección de las mismas en cantidades no inferiores al rango del kilogramo.

Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación es procurar proveer como resultado un método orientador de los criterios a aplicar, cuando se desee identificar un número mayor de sustancias, en condiciones reales, con baterías de detectores tecnológica y económicamente factibles, buscando detectar cualitativamente, la presencia de mercurio (Hg), cadmio (Cd), cloro (Cl) y cromo (Cr) al irradiarlos con neutrones, analizando las señales gamma prompt y de temprano decaimiento emitidos por los núcleos activados.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el año 2012 se realizaron mediciones experimentales con el acelerador lineal de electrones (LINAC). Posteriormente, durante los años 2013 – 2015, se aplicó la fuente isotópica de AmBe. Durante el año 2012, se utilizó un grupo de cuatro detectores centelladores de NaI(Tl) de 2 plg ubicados estratégicamente para la correcta detección de los gammas prompt mientras que, en los años posteriores, se utilizó un detector semiconductor de Ge(Li).

Dado que, en el año 2013, se ha utilizado el detector semiconductor de Ge(Li) que posee una mayor resolución en energía y por lo tanto, los picos gamma característicos de cada muestra pueden observarse con nitidez, se procedió a considerar como línea de base los espectros de dicho año a fin de seleccionar las regiones de interés (ROI) adecuadas para ser aplicadas en caso de utilizar detectores de baja resolución en energía, donde las líneas gamma no serían evidentes como “picos” en los espectros de una aplicación comercial. Las ROI consideradas son regiones de cada espectro gamma que incluyen un determinado rango de energía, seleccionadas experimentalmente y en concordancia con la bibliografía existente. Por lo tanto, cada elemento químico posee diferentes ROI acorde a los resultados obtenidos en cada espectro. Entre las ROI seleccionadas se encuentra una o varias ROI de referencia (ROIref) propias de cada elemento químico, cuya característica es la ausencia de picos gamma propios de la muestra en el rango de energía que involucre la ROIref.

La metodología aplicada para el cálculo de las regiones de interés consistió en dividir la sumatoria de las cuentas de cada ROI de la muestra por la sumatoria de las cuentas de la ROIref de la misma muestra. El cociente obtenido es comparado con el fondo inducido

por la fuente (Bg), al cual se le aplicó el mismo análisis. Posteriormente, se comparan los resultados de la muestra y el Bg, con sus respectivas incertezas estadísticas, verificando que las barras de errores no se solapen, en dicho caso, es factible afirmar que la muestra puede ser detectada debido a la presencia de picos gamma diferentes al Bg.

Esta metodología de análisis facilita la detección de los elementos químicos de interés cuando no es posible observar los picos gamma de la muestra debido a la baja detección y/o señal proveniente de la muestra. Por otro lado, a escala real, no es relevante la medición del Bg ya que este varía acorde al sitio de escaneo y la composición del contenido del contenedor, en el cual se busca detectar la presencia de dada sustancia. Pero en esta instancia, es de suma importancia poder estudiar si es factible detectar la muestra con un Bg conocido. También, cabe mencionar que, el análisis de los espectros fue aplicado a aquellos que han completado el tiempo de medición y que no presentan señales gamma propias de la activación del detector.

En cada medición experimental se ha realizado la calibración energía-canal a fin de poder aplicar correctamente y en forma exacta las ROI seleccionadas. Este aspecto debe recibir especial atención debido a los corrimientos continuos de los espectros, los constantes inconvenientes en las mediciones por cortes de luz y la activación de los detectores con la correspondiente emisión de radiación gamma espuria, entre otros aspectos. En relación a los tiempos de medición aplicados con la fuente de AmBe fueron entre 86400 s y 172000 s debido al bajo flujo neutrónico mientras que con el LINAC, se utilizaron tiempos vivos de 300 s. Cada medición fue normalizada por el tiempo de medición con el objeto de poder comparar los resultados.

El tiempo de medición que se considera aplicar a escala real, a fin de que el diseño sea acorde a la demanda, es de 5 min. Este tiempo fue seleccionado considerando que el LINAC posee el blanco a 6 m de la muestra simulando un acelerador de menor flujo que a menor distancia que se aplicaría en las aduanas y con un tiempo de 300 s sería posible obtener un espectro representativo de la muestra. Cabe citar que el escaneo del contenedor se realiza por franjas, por lo cual cada franja requerirá de 300 s. Por lo tanto, solo se considerará la señal gamma cuyos períodos de semidesintegración son del orden de los minutos.

A continuación se presentan algunos arreglos implementados para las diferentes mediciones con neutrones en el rango térmico “ver Fig. 1a y b”.

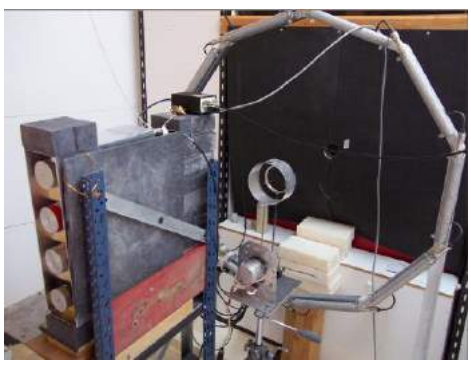


Figura 1. a. Arreglo con el LINAC



b. Arreglo con la fuente de AmBe

En las Tablas I, II, III y IV se resumen los resultados de las mediciones de las muestras detallados por año de medición. La letra “X” indica que es posible detectar la muestra aplicando este análisis.

Tabla I

ROI-Cd	2012	2013	2014	2015	**Resul.**
0	4/6	3/3	3/3	3/3	13/15
1	6/6	3/3	3/3	3/3	**15/15**
2	6/6	3/3	3/3	3/3	**15/15**
3	6/6	3/3	3/3	3/3	**15/15**
4	4/4	2/2	2/2	1/2	9/10
5	6/6	3/3	3/3	3/3	**15/15**
6	4/4	1/2	1/2	1/2	7/10
6.1	4/4	1/2	1/2	0/2	6/10
6.2	6/6	1/3	1/3	1/3	9/15
7	0/0	1/3	1/3	0/3	2/9

Tabla II

ROI-Cl	2012	2013	2014	2015	**Resul.**
1	2/2	1/6	3/6	1/3	**7/17**
2	2/2	2/6	2/6	2/3	**8/17**
3	0/2	3/6	1/6	2/3	**6/17**
4	2/2	2/6	1/6	2/3	**7/17**
5	0/2	1/6	1/6	1/3	3/17
6	2/2	1/6	2/6	1/3	**6/17**
7	2/2	1/6	2/6	0/3	5/17
8	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17
9	2/2	2/6	2/6	1/3	**7/17**
10	2/2	3/6	0/6	1/3	**6/17**
11	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17

ROI-Cl	2012	2013	2014	2015	**Resul.**
12	2/2	1/6	2/6	1/3	**6/17**
13	0/2	1/6	1/6	1/3	3/17
14	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17
15	1/2	1/6	2/6	1/3	5/17
16	0/2	1/6	0/6	1/3	2/17
17	-	1/4	0/4	1/2	2/10
18	2/2	1/6	4/6	3/3	**10/17**
19	2/2	3/6	4/6	3/3	**12/17**
20	2/2	3/6	5/6	3/3	**13/17**
21	2/2	1/6	4/6	2/3	**9/17**
22	2/2	0/6	0/6	0/3	2/17
23	-	1/4	0/4	1/2	2/10
24	-	0/4	0/4	0/2	0/10

Tabla III

ROI	Hg I	Hg II	Hg líq 17 6 13	Hg líq 25 5 13	HgO 13 8 13	HgO 30 5 13	HgO 15 10 14	Hg liq 22 10 14	HgO 26 3 14	Hg líq 13 2 15	**Resul.**
0				X		X		X			3/10
1	X	X		X		X					4/10
2	X	X		X	X						4/10
3	X			X							2/10
4	X			X	X						3/10
5	X			X							2/10

 ISBN 978-987-1323-66-1

ROI	Hg I	Hg II	Hg líq 17 6 13	Hg líq 25 5 13	HgO 13 8 13	HgO 30 5 13	HgO 15 10 14	Hg liq 22 10 14	HgO 26 3 14	Hg líq 13 2 15	**Resul.**
6	X			X	X						3/10
7				X	X	X					3/10
8	X	X		X	X	X					5/10
9	X	X		X	X		X		X	X	7/10
10				X							1/10

Tabla IV

ROI	Cr I	Cr II	17 7 13	22 8 13	17 10 14	12 2 15	26 2 15	**Resul.**
1	X	X	X	X	X	X	X	**7/7**
2	X	X	X					3/7
3			X			X		2/7
4			X			X		2/7
5			X			X		2/7
6	X	X				X		3/7
7						X	X	2/7
8	X	X	X	X	X	X	X	**7/7**
9	-	-						0/5
10	-	-	-	-				0/3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta instancia se procedió a realizar un nuevo análisis a fin de identificar otras herramientas y/o prescripciones que permitan identificar las muestras de interés. Para ello, se consideró relevante trabajar con los resultados obtenidos al irradiar con neutrones en el rango térmico y epitérmico. Este análisis se aplicó solo a los resultados obtenidos con el LINAC, considerando que un acelerador es lo recomendable para ser

utilizado a escala real en caso de un escaneo. Las ROI seleccionadas para cada muestra fueron divididas previamente por sus respectivas ROIref.

Aplicando los pasos detallados anteriormente, se obtienen diferentes "formas" propias de cada muestra. En el caso del Cd, se observa una "doble loma" "ver Fig. 2a" en cambio, el Cl posee una "pendiente positiva al inicio con una loma importante y puntiaguda al final" "ver Fig. 2b". El Hg posee "tres lomas" "ver Fig. 2c" y el Cr, una "línea cuasi-continua con una pequeña loma al final" "ver Fig. 2d". Cabe citar que, en los casos de las muestras Cl I y Cr I, las mediciones no responden a la tendencia mayoritaria de las curvas que otorgan la "forma" del elemento químico; en dicho caso se observa un apartamiento espurio.

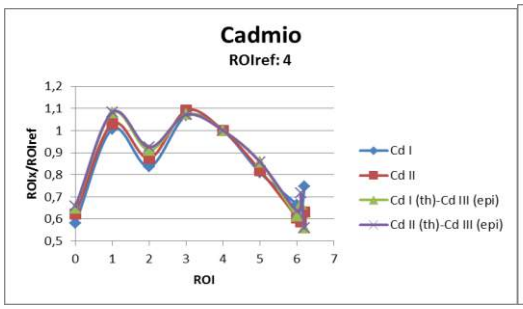
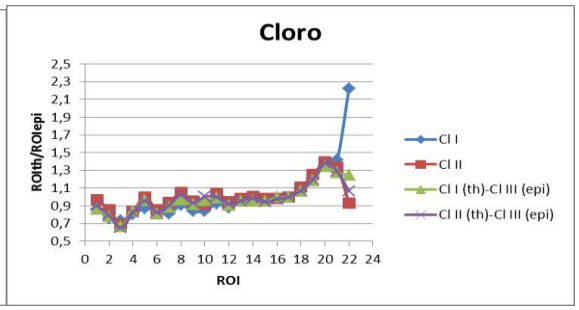


Figura 2. a. Forma muestra Cd.



b. Forma muestra Cl.

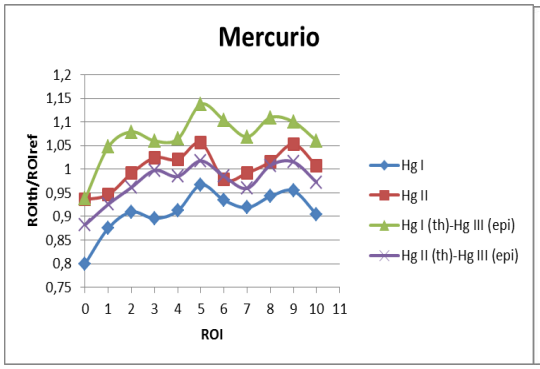
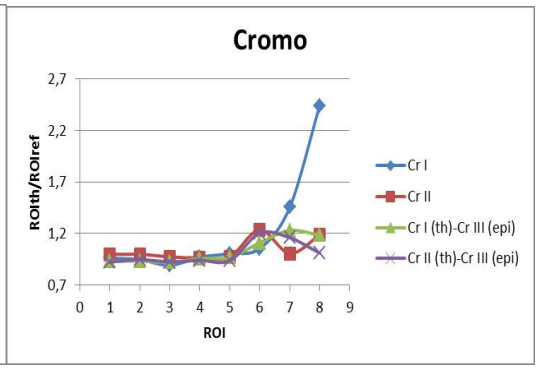


Figura 2. c. Forma muestra Hg



d. Forma muestra Cr

A fin de verificar si este procedimiento es fidedigno para ser aplicado en la detección de estas sustancias químicas, se tomaron las cuentas originales obtenidas en las mediciones con el LINAC y se aplicó la prescripción de otra sustancia química, como por ejemplo, las cuentas del Cd fueron analizadas como si fueran Cl, es decir, las cuentas del Cd se dividieron en los rangos de energías (ROI) establecidos para el Cl aplicando la ROIref propia del este último elemento químico. Este análisis se repitió para las cuentas obtenidas en ambos rangos de energía del neutrón. El resultado que se espera no obtener es la "forma" propia del Cl dado que, las cuentas utilizadas pertenecen al Cd. Si es posible alcanzar esta respuesta, el procedimiento es apto para descartar sustancias químicas en caso de duda.

En los casos que se presentan a continuación, las señales espurias fueron eliminadas de las Figuras debido a que se tratan de mediciones fallidas. En las Figuras 3a y b se presentan algunos casos estudiados a fin de mostrar los resultados favorables obtenidos.

En la primera Figura se utilizan las cuentas del Cd y se analizaron aplicando la prescripción del Cl, observando que no se obtiene la "forma" propia del Cl. En la segunda Figura se aplica la prescripción del Cr a la muestra de Hg, sin obtener la "forma" del Cr.

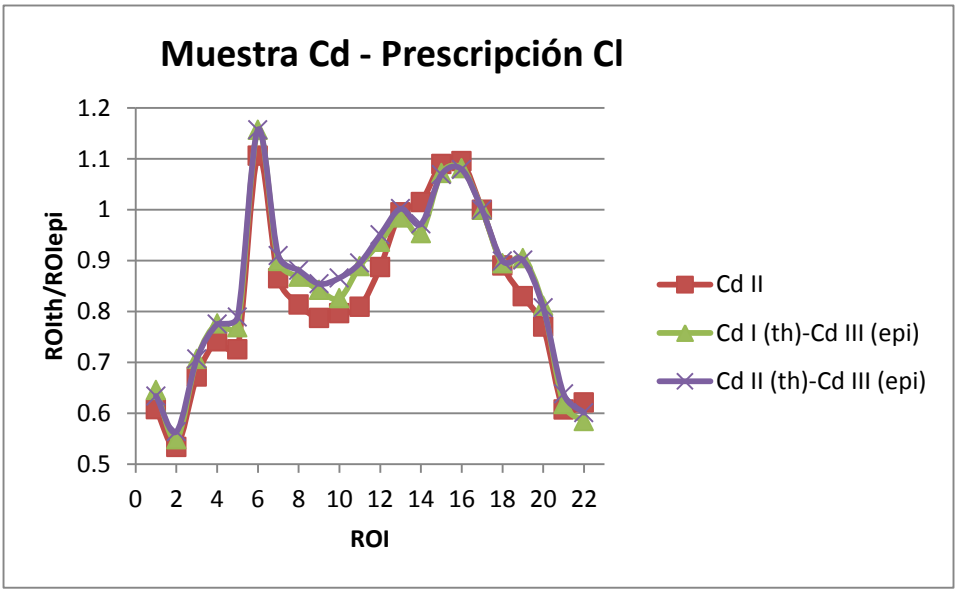


Figura 3. a. Muestra de Cd con prescripción de Cl.

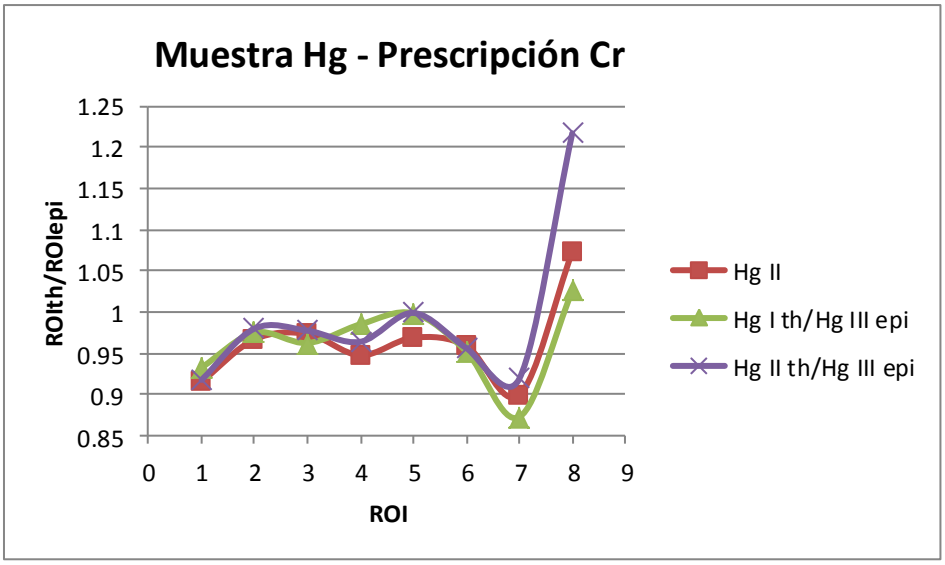


Figura 3. b. Muestra de Hg con prescripción de Cr.

CONCLUSIONES

En primera instancia se realiza un análisis de las mediciones experimentales concretadas con el LINAC y con la fuente isotópica de AmBe. Este análisis se desarrolló durante cuatro años de medición. Es de relevancia destacar la importancia de lograr minimizar el fondo de radiación inducido por la fuente (identificado como Bg) en las mediciones a fin de evitar que, la señal propia de la muestra no pueda ser detectada debido al ruido

que genera el entorno. Es por ello que ha resultado imprescindible llevar adelante los experimentos que fuesen posibles, en lugar de solamente cálculos que tomasen en cuenta las secciones eficaces de captura neutrónica, las emisiones tabuladas, las eficiencias intrínsecas de detección y las geometrías imaginables. En las mediciones experimentales se ha identificado que la activación de los detectores y los daños por radiación son aspectos a considerar debido a la interferencia que genera en la detección de señales gamma provenientes de la muestra. No debe menospreciarse la ubicación del blindaje al realizar el montaje del experimento de laboratorio, dado que la ubicación del mismo genera radiación gamma de backscattering interfiriendo y emitiendo señal no deseada e inútil a los fines de la detección. Debido a ello, se han realizado reiteradas pruebas, no solo a fin de optimizar la señal proveniente de la muestra, sino también para mejorar la protección a los trabajadores y a los detectores. En el caso del estudio a escala laboratorio, era imprescindible conocer el Bg con exactitud a fin de poder definir las regiones de interés en energía, mediante las cuales resultara posible poner de manifiesto las señales propias de la muestra a interrogar que realmente fueran útiles a los fines de la detección práctica.

Otro aspecto a observar es la resolución en energía de los detectores que se utilizarán a escala real y aquellos utilizados en los experimentos realizados en el presente trabajo. El detector semiconductor Ge(Li) aquí empleado, poseen una elevada resolución en energía pero operativamente resultan poco convenientes debido al requerimiento de refrigeración continua con nitrógeno líquido o refrigeradores eléctricos, la dificultad para manipularlos debido al tamaño y peso y los elevados costos. Los detectores centelladores de NaI(Tl), en cambio, son más económicos, más fáciles de manipular pero poseen una resolución en energía menor a los detectores semiconductores. Si bien se ha empleado una limitada batería de detectores NaI(Tl) motivado por la posibilidad tecnológicamente accesible de aplicación de un número considerable de tales conjuntos en un portal real, se debe tener presente que en el futuro los detectores centelladores de $LaBr_3$, que poseen una resolución en energía cercana a los detectores semiconductores, podrían constituir la preferencia en caso que sus costos lo tornasen viable.

Durante el desarrollo de la presente investigación pudo observarse la importancia de poseer y utilizar un flujo de neutrones adecuado, incluso aplicando una fuente isotópica. Los aceleradores pulsados son los equipos que deben implementarse en el control de grandes contenedores a fin de optimizar y alcanzar satisfactoriamente el objetivo deseado. El carácter pulsado del equipo permite analizar detalladamente la reacción (n,γ) en el tiempo que transcurre entre pulsos (disparos del acelerador), permitiendo generar un haz amplio que irradie una sección importante del objeto sometido a revisión. En caso de operar con la reacción D-T, se accede a las reacciones (n,γ) correspondientes a la emisión de neutrones de 14,1 MeV, lo cual podría aprovecharse simultáneamente con los análisis de irradiaciones térmico y epitérmico mediante un diseño apropiado del moderador neutrónico que permita el escape de los rápidos, siendo que las reacciones debidas a los neutrones lentos se darán suficiente tiempo después merced a los tiempos de moderación y de vuelo de estos neutrones lentos. También presentan la ventaja de operarse sólo cuando es requerido, a diferencia de las fuentes isotópicas que, por ser continuas, deben tratarse con la debida precaución en todo momento.

Los elementos químicos estudiados fueron motivados por el carácter tóxico que presentan los mismos para el ambiente y por consiguiente, para la salud de los seres humanos. Estos compuestos se encuentran regulados por variadas normativas locales, nacionales e internacionales. Por lo tanto, poder diseñar una herramienta y/o metodología que permita confirmar la presencia de los mismos en grandes volúmenes, es el principal objetivo a alcanzar. Dado que el fin es elaborar el método para la selección de los datos medibles de un dado elemento químico y luego la forma de procesamiento para obtener el resultado, no se buscó hacer un catálogo exhaustivo de sustancias de interés, sino poner el énfasis en la metodología al trabajar con un conjunto limitado de sustancias particularmente significativas.

El Cd presenta una respuesta gamma significativa especialmente con neutrones térmicos debido a la elevada sección eficaz del compuesto para neutrones de baja energía. El Cl posee, también, una elevada sección eficaz para neutrones térmicos por ello, era esperable obtener una respuesta gamma significativa con neutrones en dicho rango de energía. Los resultados obtenidos con este compuesto son concordantes con los resultados obtenidos anteriormente por Mayer *et al.* El estudio del Hg requirió de mayor dedicación y atención debido a la poca señal gamma que se obtenía de la muestra y en los experimentos realizados con el Cr se puede afirmar que la sustancia es factible de ser detectada considerando las ROI específicas para cada energía del neutrón incidente.

Los resultados más satisfactorios fueron aquellos alcanzados con los cocientes que involucran las sumatorias de las ROI obtenidas, mediante el LINAC, con neutrones térmicos y epitérmicos (ROI_{th}/ROI_{epi}). En las muestras puras, es decir, sin realizar ningún tipo de mezcla fue factible indicar las sustancias que no se encontraban presentes en dicha muestra.

Estos procedimientos de detección buscan generar metodologías y/o prescripciones que permitan realizar escaneos de porciones del contenedor en tiempos breves (5 min aprox.) para obtener una pronta respuesta. A fin de agilizar dicha respuesta se propone ejecutar varios análisis en paralelo aplicando las prescripciones y/o metodologías planteadas y buscando corroborar fehacientemente la información que se obtiene de los diferentes sistemas de procesamiento de datos. En caso de falla o duda en alguno de los resultados, se cuenta con la información suministrada por las otras metodologías desarrolladas, brindando una advertencia en caso de la presencia no declarada de una sustancia química.

Nuevamente se recalca la importancia de implementar un acelerador tipo D-T, diseñar un buen sistema de blindaje a fin de disminuir el Bg, implementar detectores de elevada resolución en energía y ubicarlos en forma estratégica y mantener un control continuo de todo el sistema de adquisición de datos y detección a fin de evitar el procesamiento de señal espuria procedente de la activación de los detectores incluyendo los daños por radiación.

Dado el espesor de 2,40 m de los grandes contenedores aduaneros, pruebas realizadas en la instalación con anterioridad al trabajo presente, sugieren la muy probable necesidad de realizar la revisión del cargamento, simultánea o alternativamente, desde ambos lados del mismo.

Resumiendo, el desarrollo de este trabajo de investigación permitió otorgar estrategias que fortalezcan la implementación de herramientas de confirmación para el control transfronterizo de sustancias químicas peligrosas.

REFERENCIAS

Tartaglione, A. *Desarrollo de técnicas de detección de sustancias por irradiación pulsada de neutrones*. Tesis (doctorado en ciencias de la ingeniería). Bariloche, Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro, 17 p (2009).

Mayer, R. E. M. *Moderación optimizada de pulsos de neutrones*. Tesis (doctorado en física). Bariloche, Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro, 106, 107 p (1998).

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACION - ESCORRENTIA EN LA CUENCA ALTA DEL RIO SAUCE CHICO. PROVINCIA DE BUENOS AIRES

de Antueno L.[a], Gaspari F. J.[a] y Guzmán Guaraca A.[b]

[a] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*
[b] *Becario Doctoral CICPBA - CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

El conocimiento y evaluación de la influencia que generan los diversos eventos pluviales sobre el uso del suelo es incipiente, especialmente cuando se analiza su integración al fenómeno precipitación–escorrentía. El objetivo es representar cartográficamente la interacción entre diversos eventos pluviales sobre los coeficientes de escorrentía e infiltración. Para ello se realizó un análisis pluvial con el fin de establecer una tormenta modal y otra extrema para aplicar, con sistemas de información geográfica, a la definición de la relación precipitación-escorrentía superficial en la actualidad, en la Cuenca Alta del Río Sauce Chico. Se desarrolló la metodología del Número de Curva para establecer ambos coeficientes. La modelización se realizó aplicando dos tormentas obtenidas de la lectura de fajas pluviográficas, una extrema (81,2 mm) (año 1986) del Servicio Meteorológico Nacional de Tornquist y una modal (26,5 mm) (año 1990) de la Cooperativa Rural, ambas con una duración de 480 minutos, tomada cada 0,5 horas, siendo esta última considerada como testigo de las condiciones climáticas normales. Los resultados alcanzados evidencian que para una precipitación modal los valores de coeficiente de infiltración (CF) <0,4 se expresan en la zona de valles y cañadas de la parte alta de la cuenca; y los >0,4 ocurren en la zona de lomadas a baja, con predominio de actividad agropecuaria. Para el evento extremo la situación se invierte, los valores máximos ocurren en gran parte de la cuenca alta y media. En cuanto al coeficiente de escorrentía (CE), durante eventos modales, los máximos CE ocurren en la proximidad de los valles y en la parte baja de cuenca, siendo el CE<0,25. Si bien esta respuesta también se evidencia para eventos extremos, los valores de CE en todos los casos son >0,25 y ascendiendo hacia las nacientes de la cuenca, con valores >0,6.

Palabras Clave: Análisis de eventos, NC, Coeficiente de infiltración, Coeficiente de escorrentía

INTRODUCCIÓN

La variabilidad en la respuesta a la relación precipitación-escorrentía en una cuenca está dada por la interacción de distintos factores, entre los mismos se pueden mencionar las diferencias en la distribución espacial de las tormentas, la intensidad de las precipitaciones y la capacidad de retención hídrica del terreno. Otros factores son el tiempo transcurrido desde la última precipitación y la evapotranspiración durante ese

período que, junto a las propiedades edáficas, condicionan la humedad del suelo (Pilgrim & Cordery, 1993; Ponce & Hawkins, 1996).

En el área de las sierras bonaerenses argentinas, el aumento de las precipitaciones y de la superficie destinada a agricultura ha contribuido a la generación de excesos de escurrimiento de gran impacto en la región y a la erosión hídrica de las tierras. La relación lluvia-escurrimiento en esta región permitirá estimar los efectos de las crecidas. (Ares et a., 2012).

En este contexto, resulta fundamental el análisis de datos observados de lluvia y escurrimiento en series de largo plazo que abarquen un amplio rango de condiciones hidrológicas. Contar con esta información permite la estimación de distintos parámetros que describan la generación del escurrimiento en cuencas. Entre ellos, el coeficiente de escurrimiento (CE), que es la proporción de lluvia que se convierte en escurrimiento directo durante un evento, es una variable clave en hidrología que permite diagnosticar la respuesta de la cuenca bajo situaciones diversas (Merz y Blöschl, 2009).

El escurrimiento superficial es una de las variables hidrológicas más importante en el análisis de la dinámica hídrica y su modelización, considerado como el agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. Su distribución temporal y espacial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari et al., 2009).

Por otra parte, el método del Número de Curva es utilizado para predecir el volumen potencial de escorrentía directa para un evento de lluvia en pequeñas cuencas agrícolas, forestales y urbanas (Mishra and Singh 2003; Soulis et al., 2009). Este modelo considera los principales factores que afectan la generación de escorrentía integrados en un solo parámetro: el CN (Soulis et al., 2009). Los valores de CN pueden ser obtenidos de las tablas publicadas en la Sección 4 del National Engineering Handbook (NEH-4). Sin embargo, es conveniente determinarlos a partir de datos locales de lluvias y escurrimiento (Hawkins, 1993; Tedela et al., 2012). Distintos factores condicionan la variabilidad temporal de estos parámetros como las características de las precipitaciones en cuanto a su magnitud, el estado de la cuenca previo a un evento (Merz and Blöschl, 2009) o el estado o el tipo de cobertura vegetal.

El objetivo es representar cartográficamente la interacción entre diversos eventos pluviales sobre los coeficientes de escorrentía e infiltración.

METODOLOGÍA

El área de estudio comprende al sector serrano de la Cuenca del río Sauce Chico (373,24 km^2), ubicada en la región pampeana en el suroeste de la Provincia de Buenos Aires (ver Fig. 1). El curso principal nace en el cordón serrano Bravard-Ventania con pendientes entre el 2-18% (Gaspari, 2007; de Antueno et al, 2020).

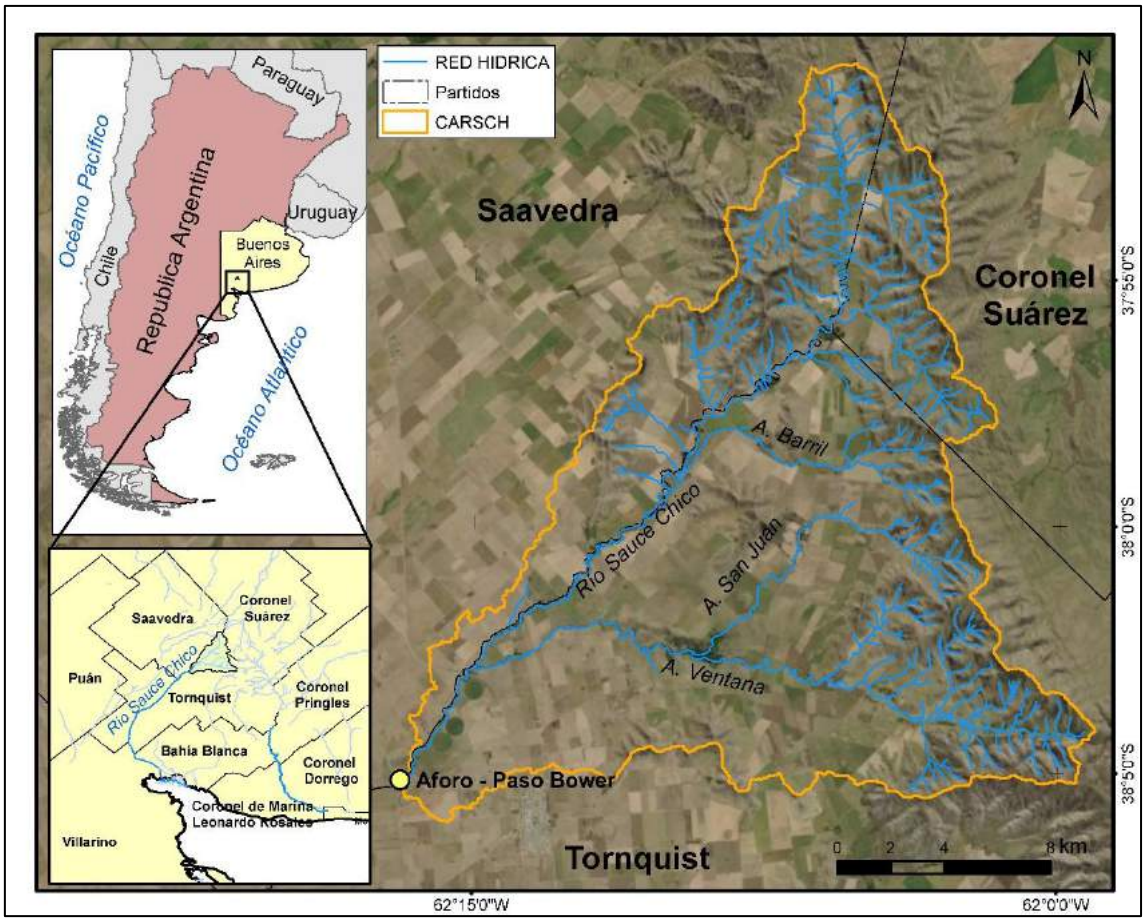


Figura 1. Ubicación de la Cuenca alta del río Sauce Chico. Argentina. Fuente: de Antueno et al, 2020.

Se trata de una zona con actividades agropecuarias que sustituyen la vegetación natural por especies forrajeras, en las partes altas, y cultivos agrícolas, en las zonas de piedemonte y planicie. Sus principales características físicas están representadas por la topografía, influyendo en su dinámica biofísica, social y económica. El clima es templado y subhúmedo seco caracterizado por inviernos húmedos, veranos secos (de Antueno et al, 2020). Los suelos presentes son del orden de los Molisoles, representados por asociaciones de: Argiudol típico en lomas, pendientes y planicies es muy profundo (140 cm); Haplustol típico, fino en el fondo del valle; Haplustoléntico y Haplustol lítico en los interfluvios, desarrollados sobre material loéssico que cubre totalmente las laderas de las sierras, y este a su vez se ubica sobre una costra calcárea (tosca) que oscila los 100 cm de espesor, según los diferentes accidentes que presente su topografía (FUNS, 2011; Gaspari, 2007).

El modelo hidrológico más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región geográfica es el método del número de curva (NC). Este método, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972), se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso de este y de su cubierta vegetal (Gaspari et al., 2015). El método utiliza una ecuación para cuantificar el escurrimiento superficial que se expresa como el cociente entre $(P - Ia)^2$ y

(P – Ia + S), donde P es la precipitación, Ia es la abstracción inicial, S es el máximo potencial de retención de la cuenca ante un evento de tormenta. El S se determina por el cociente entre (25.400 – 254 x NC) y NC es número de curva, representado por la combinación de valores entre el grupo hidrológico de suelo, las clases de coberturas y usos del suelo y la condición de humedad antecedente del suelo. El SCS desarrolló una relación empírica entre Ia y S, siendo Ia= 0,2 x S (Gaspari et al., 2015; de Antueno et al, 2020).

La aplicación del modelo requiere de cartografía en formato vectorial, codificadas de forma tal que, luego del rasterizado automático, procesamiento y asignación de valores particulares según el caso, se genera un mapa de distribución de número de curva (NC) a partir del cual se determina lámina de escurrimiento, aplicando la metodología del SCS. El modelo cuantifica el escurrimiento superficial en función del volumen y profundidad de la lámina (Wang et al., 2005) a partir de datos de precipitación (Rodríguez Vagaría y Gaspari, 2014).

Para establecer el escurrimiento directo (Q) (mm), se aplicó la Ec. 1 que depende de la Precipitación total acumulada (P) (mm) y de las Pérdidas iniciales (Io).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4.I_0} = \frac{(P - 0{,}2.S)^2}{P + 0{,}8.S} \quad (1)$$

Conociendo que, el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de escorrentía (Io), se define que el coeficiente de escurrimiento (CE) es el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el total precipitado (P) (Ec.2).

$$CE = Q.P^{-1} \quad (2)$$

La infiltración (F), expresada en milímetros, que ocurrirá ante una determinada precipitación se determina con la Ec.3.

$$F = \frac{S(P - I_0)}{P - I_0 + S} \quad (31)$$

Asimismo, puede definirse que el coeficiente de infiltración (CF) de una superficie, como el cociente del caudal que se infiltra en esa superficie (F), en relación con el caudal total precipitado (P) (ver Ec.4).

$$CF = F.P^{-1} \quad (4)$$

Entonces la suma de las láminas resultantes de la aplicación de los coeficientes, CE y CF, y de Io debe dar como resultado el total del agua precipitada.

En el estudio se aplicaron dos tormentas obtenidas de la lectura de fajas pluviográficas, representando una de condición extrema (81,2 mm) (año 1986) del Servicio Meteorológico Nacional de Tornquist y una modal (26,5 mm) (año 1990) de la

Cooperativa Rural, ambas con una duración de 480 minutos, tomada cada 0,5 horas, siendo esta última considerada como testigo de las condiciones climáticas normales (ver Fig 2).

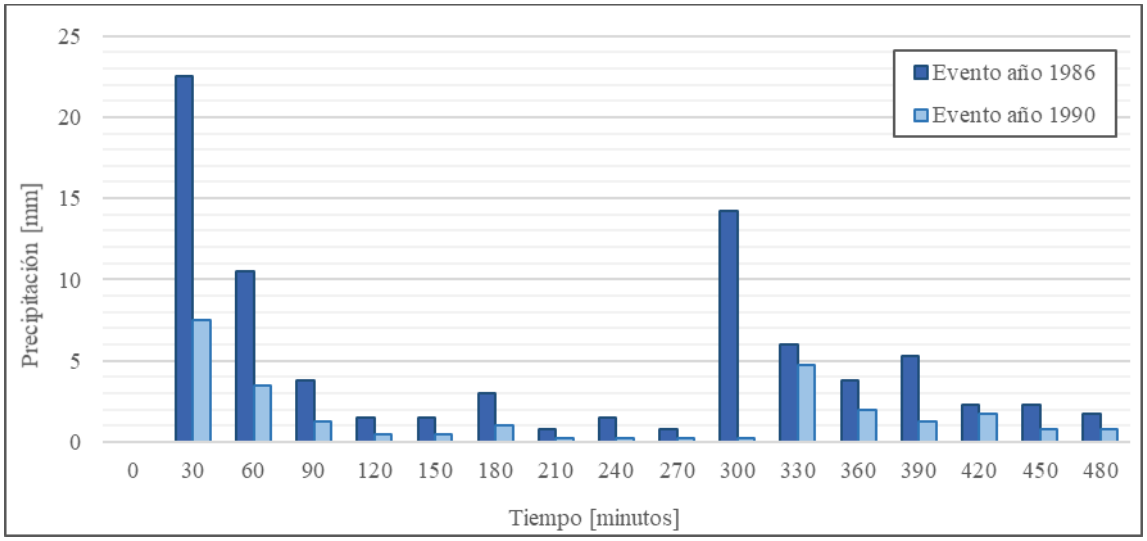


Figura 2. Eventos pluviales modelados. Fuente: de Antueno et al, 2020.

RESULTADOS

La zonificación de cobertura y uso del suelo conformó un porcentaje de área ocupada por uso agropecuario de 51,3%, de uso forestal con 1,8%, pastizal 13,8%, ribereño 2,8 %, pastizal con presencia de roca en superficie de 29,2% y urbano solo el 1,1% del total de la cuenca en estudio (ver Fig.3a). El uso agropecuario presenta medidas de conservación de suelos, el monte expresa mayor cobertura de suelo, pero no así extensión; y la urbanización es tipo residencial de baja densidad.

El análisis textural de los suelos permitió zonificar los GH según: el B que se presenta desde la cabecera hacia la zona periserrana ocupa el 67,13% de la cuenca, el C se extiende sobre el 32,43% y el D en una menor proporción en la cuenca, solo el 0,45% (ver Fig.3b).

El procesamiento de estos mapas de uso del suelo y GH permitió la zonificación del NC según la Figura 3c, donde predomina el valor entre 60 y 80. La interacción entre el uso agropecuario y el GH C es mayoritario en la cuenca baja. En la cuenca alta se expresa el pastizal serrano con GH B. Particularmente en las zonas ribereñas se expresa el GH C.

En la modelización del evento extremo, los valores máximos de Q ocurren en gran parte de la cuenca alta y media. En cuanto al coeficiente de escorrentía (CE), durante eventos modales, los máximos suceden en la proximidad de los valles y en la parte baja de cuenca, siendo el CE<0,25. Si bien esta respuesta también se evidencia para eventos extremos, los valores de CE en todos los casos son >0,25 y ascendiendo hacia las nacientes de la cuenca, con valores >0,6 (ver Fig. 4 a y b)

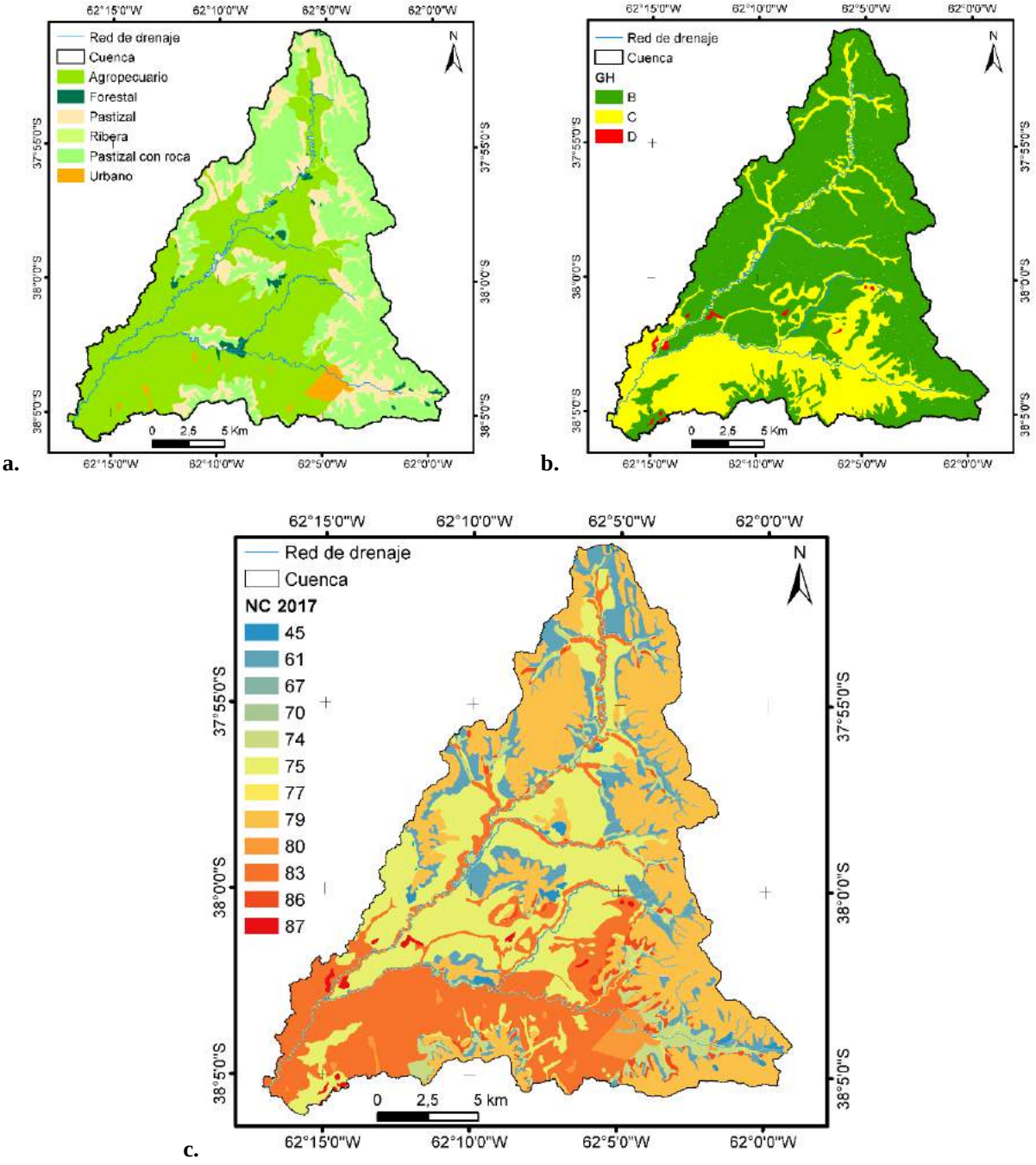


Figura 3. a. Zonificación del cobertura vegetal y uso del suelo, **b.** GH, **c.** NC.

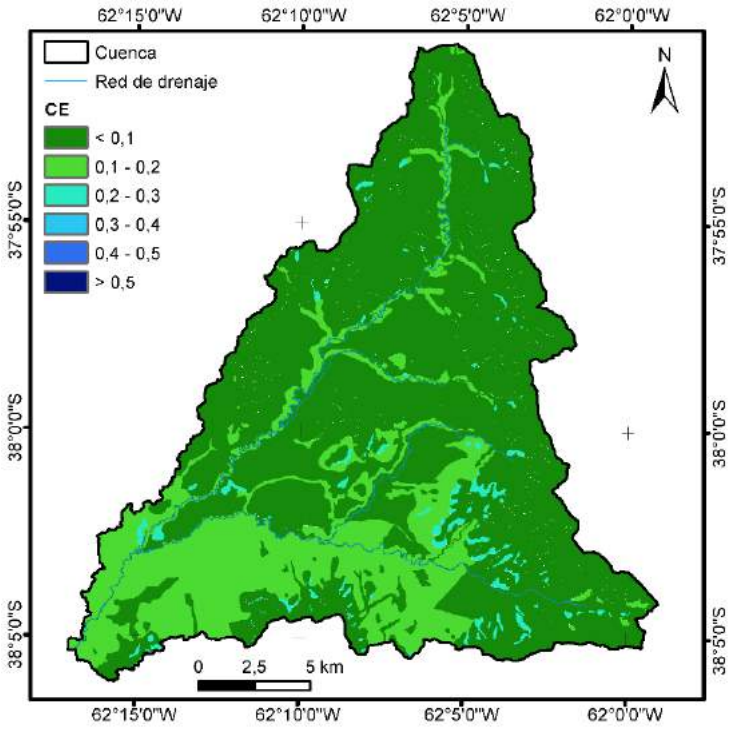


Figura 4.a. CE evento modal.

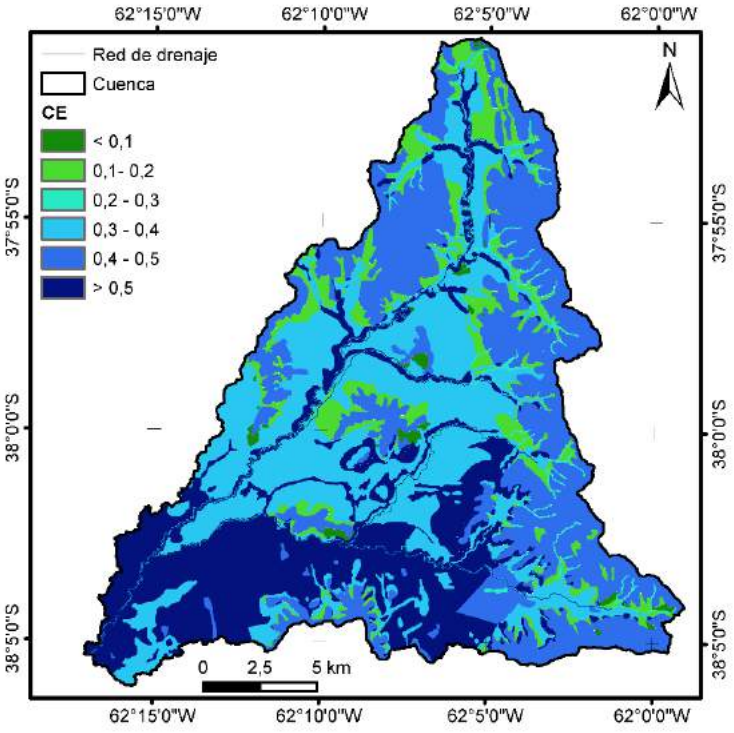


Figura 4.b. CE evento extremo.

Los resultados alcanzados para F evidencian que para una precipitación modal los valores de coeficiente de infiltración (CF) son <0,2 y se expresan en la zona de valles y cañadas de la parte alta de la cuenca, en coincidencia con el GH C. El rango entre 2,0 y 0,4

predomina en la zona media de la cuenca. Los CF >0,4 ocurren en la zona de lomadas a baja, con predominio de actividad agropecuaria y pastizal con roca (ver Fig. 5 a y b).

En el caso del evento extremo, el CF se comporta con valores <0,4 en cañadas y zona agropecuaria baja, en coincidencia con el GH C, y los valores > 0,4 se identifica en el resto de la cuenca estudiada.

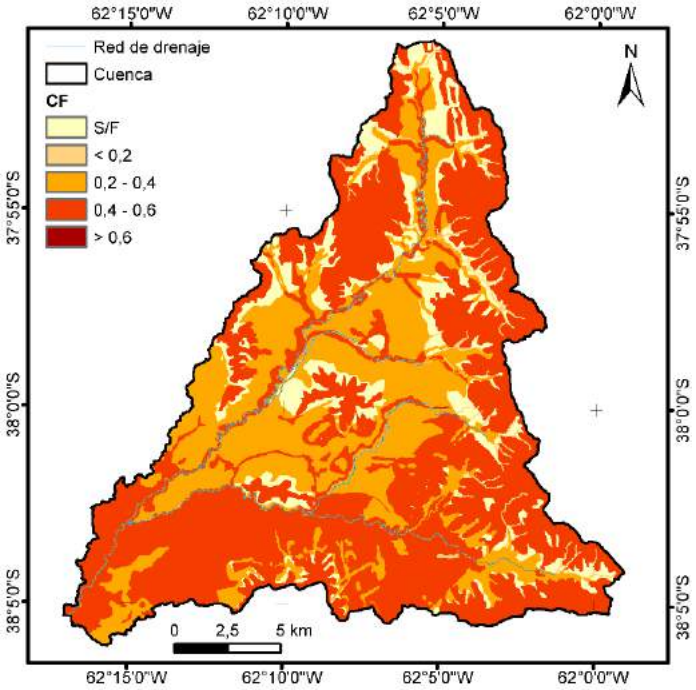


Figura 5.a. CF evento modal.

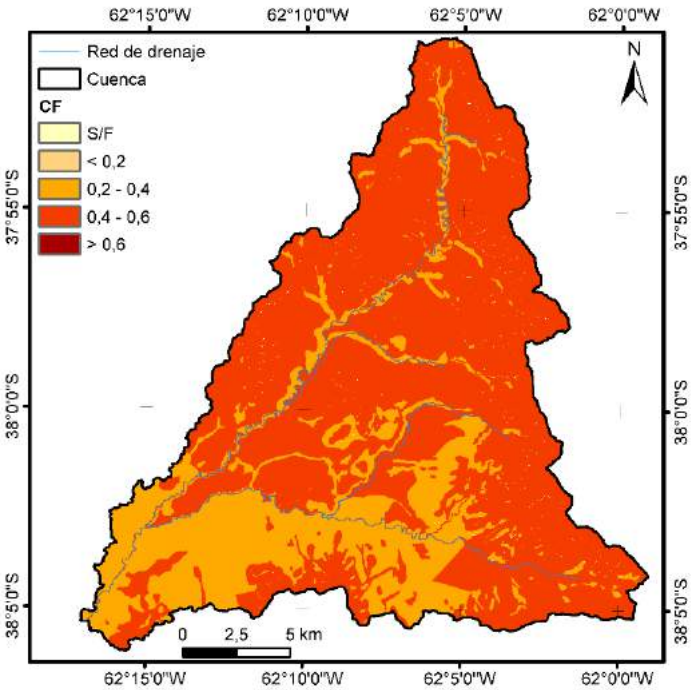


Figura 5. b. CF evento extremo.

En la Fig. 6 se representa el porcentaje de ocupación del CE en comparación para ambos eventos evaluados, expresando que ante la ocurrencia de una tormenta modal en el 97 % de la cuenca el CE es menor a 0,2, indicando mayores abstracciones e infiltración.

En el caso de producirse un evento torrencial el escurrimiento se presenta en forma inversa, es decir, solo el 10% de la superficie de la cuenca escurre menos de 0,2 y el resto de la cuenca indica valores superiores, hasta alcanzar más del 0,6 en la zona agropecuaria.

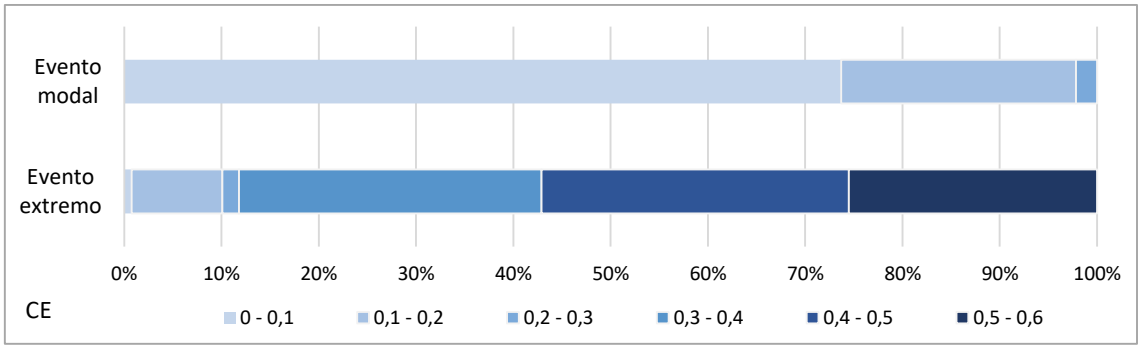


Figura 6. Comparación de la superficie de ocupación de CE.

En cuanto a la superficie de ocupación del CF en la cuenca, en el caso del evento extremo el 74% de la infiltración es mayor a 0,4, la cual disminuye ante un evento modal a 57%. En este último caso las abstracciones representan un 12%.

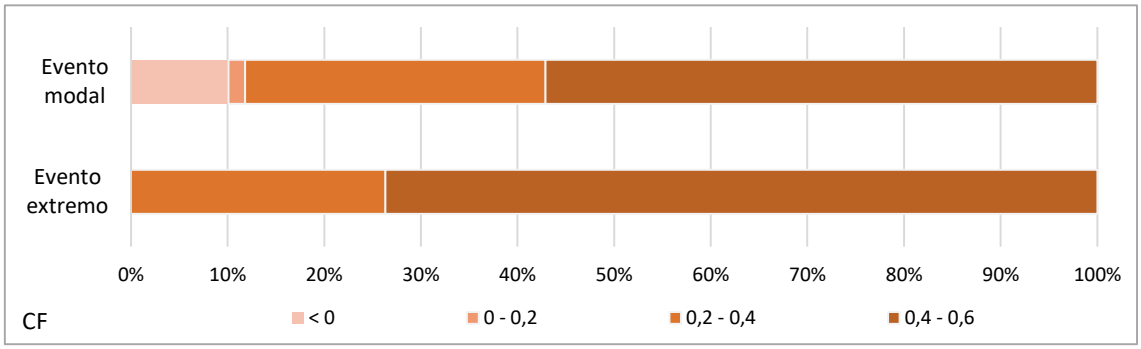


Figura 7. Comparación de la superficie de ocupación de CF.

En comparación de la respuesta de la cuenca ante ambas tormentas, en el evento modal predomina el escurrimiento bajo, porque prevalecen las abstracciones, limitando el agua que ingresa al suelo. Para el caso del evento extremo, el aumento del escurrimiento es acompañado por mayores infiltraciones, siendo menores las abstracciones, debido a la intensidad del aguacero y la arquitectura de la cobertura y uso del suelo.

CONCLUSIONES

A través de los procedimientos presentados se representó cartográficamente la interacción del complejo suelo-vegetación en relación con dos eventos pluviales, uno modal y otro extremo, y su expresión como coeficientes de escorrentía e infiltración.

El análisis realizado presentó diferentes respuestas de la cuenca en función del tipo de evento de precipitación modelado. En eventos de lluvia extrema, el coeficiente de escurrimiento presentó alta variabilidad, con máximos en la zona de lomadas a llana, con predominio de actividad agropecuaria y la de pastizal con roca. Mientras que, el coeficiente de infiltración presentó valores equiparables en toda la cuenca, sin evidenciar abstracciones, cuyos valores máximos se dieron en la zona media y alta de cuenca, exceptuando zonas de ribera. Los máximos valores de CE para eventos extremos ocurren, en coincidencia con los menores valores de CF.

Por otro lado, ante eventos de lluvia modal, el CE es homogéneo en toda la cuenca, sin evidenciar gran afectación asociada a la diversidad de factores que intervienen en la respuesta al escurrimiento. Mientras que, el CF, presentó alta variabilidad espacial y se evidenciaron las abstracciones. Los máximos para de CF y CE se observaron en la zona de lomadas a baja.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyecto I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Ares M. G., Chagas C. and Verni M. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia del suelo* 30(2):151-160. (2012).

De Antueno, L., Gaspari1 F. and Guzmán Guaraca A. Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista estudios ambientales.* 8:20-42. (2020).

Fundación de la Universidad Nacional del Sur FUNS. Prefactibilidad e sistematización y aprovechamiento de la cuenca del Río Sauce Chico. FUNS. Disponible en: http://biblioteca.cfi.org.ar/documento/prefactibilidad-de-sistematizacion-y-aprovechamiento-de-la-cuenca-del-rio-sauce-chico-provincia-de-buenos-aires/ (2011).

Gaspari, F J. Ordenamiento territorial en cuencas serranas aplicación de sistemas de información geográfica (SIG), Ediciones Cooperativas. 1a edición. Buenos Aires. Argentina. 10,116 pp. (2007).

Gaspari, F., Delgado, M., and Senisterra G. Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense. *GeoFocus* 9:67-82. (2009).

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E. and Díaz Gómez, A. R. Modelización hidrológica con L-THIA en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Buenos Aires, Argentina. XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná. Argentina. 8 p. (2015).

Hawkins, R.. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 119(2): 334-345. (1993).

Merz, R. and Blöschl, G. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. *Water Resources Resarch*, 45: W01405, doi: 10.1029/2008WR007163. (2009).

Mishra, S.K. and Singh, V. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 513 pp. (2003).

Picardi, M. & Giacchero, A. Productividad de la tierra agrícola en el sudoeste bonaerense. *Estudios Económicos*, 32. Disponible en: http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php ?script=sci_arttext&pid=S252512952015002200004&lng=en&nrm=iso Pilgrim, D.H. and Cordery, I., 1993. Flood runoff. In: *Handbook of Hydrology*. Maidment, D.R: Ed. McGraw–Hill Inc. New York, USA pp: 9.1-9.42. (2015).

Ponce, V.M. and Hawkins, R. Runoff Curve Number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering* ASCE, 1(1):11-19. (1996).

Rodríguez Vagaría, A.M. and Gaspari, F. J. Modelización espacial del escurrimiento medio anual en la cuenca serrana bonaerense. Séptimo Congreso de la Ciencia Cartográfica "Logros y desafíos de la Cartografía". Buenos Aires. Argentina. (2014).

Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N. and Londra, P.A. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 373-400. (2009).

Tedela, N.H.; McCutcheon, S.C., Rasmussen, T.C., Hawkins, R.H., Swank, W.T., Campbell, J.L., Adams, M.B., Jackson, C.R. and Tollner, E.W. Runoff Curve Number for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17:1188-1198. (2012).

Torrero, M. Río Sauce Chico: Estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable. Tesis Doctoral en Geografía. U.N.S. 9 pp. (2009).

Wang, Y., Choi, W. & Deal, B. M. Long-term impacts of land-use change on nonpoint source pollutant loads for the St. Louis metropolitan area, USA. *Environmental Management*, 35(2), 194-205. (2005).

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA DEMANDA HÍDRICA EN LA COMARCA TURÍSTICA SERRANA DE VENTANIA

Delgado M. I.[ab], de Antueno L.[ac] y Gaspari F. J. [ac]

[a]*Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*
[b]*División Ficología, Museo de La Plata, UNLP. CONICET. ARGENTINA*
[c]*Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

La región serrana de Ventania, en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, se encuentra actualmente en gran crecimiento económico y demográfico producto del auge turístico, que viene desarrollándose desde la década de 1990. Es por ello, que el objetivo del presente trabajo fue estimar la demanda hídrica para consumo humano en varias localidades de la comarca serrana bonaerense. Se realizó un análisis demográfico para la estimación del crecimiento poblacional en los centros urbanos de Saldungaray, Sierra de la Ventana, Tornquist, Villa La Gruta y Villa Ventana, utilizando los datos provenientes de censos oficiales y aplicando los métodos de Tasa geométrica decreciente y Proyección lineal. Se determinó un 35,7% de aumento en la población en el período censado, y un 40,9 % para el período proyectado. A partir de datos pluviométricos locales registrados en el Partido de Tornquist (período 1982-2018) se calculó una precipitación media anual de 778,6 mm, visualizándose en los tres últimos años (2016-2018) una disminución del 16% respecto del valor medio del período, expresado en el análisis de tendencia climática. Utilizando los resultados alcanzados en la estimación del consumo medio diario por habitante, de acuerdo con lo establecido en las regulaciones del Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento, se estableció la demanda hídrica para consumo humano, observándose una relación inversa entre estas estimaciones de consumo y la disponibilidad hídrica en la región.

Palabras clave: Turismo, Crecimiento demográfico, Tendencia pluvial

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se considera que el crecimiento económico incrementará la demanda del recurso hídrico para todos los usos y servicios, de este modo la urbanización presionará sobre el recurso hídrico, procurando obtener un suministro adecuado tanto en calidad como en cantidad. A su vez, el cambio climático interactuará con estos procesos, en la mayoría de los casos incrementando sus efectos (OMS, 2010). Es así que en la competencia por el recurso hídrico es atribuible a la combinación de diferentes factores (Irmak, 2010).

La región serrana de Ventania, en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, se encuentra actualmente en gran crecimiento económico y demográfico producto del auge turístico, que viene desarrollándose desde la década de 1990. Es así que la principal actividad económica en los últimos años se ha basado en el turismo (principalmente turismo rural en estancia y el ascenso a cerros característicos de la región), superando generalmente a la oferta en las épocas pico. Tal es la dimensión de esta actividad económica actualmente, que se ha creado la Asociación para el Desarrollo Turístico de la Comarca de Sierra de la Ventana. La misma posee su mayor extensión en el Municipio de Tornquist y está conformada por las localidades de Tornquist, Villa serrana La Gruta, Corredor Ruta 76, Villa Ventana, Sierra de la Ventana y Saldungaray. Se ha observado en los últimos años un crecimiento exponencial en la construcción de complejos turísticos, especialmente cabañas, tanto para habitantes permanentes como para suministrar servicios al enorme afluente turístico, el cual tiene períodos críticos de afluencia en el receso invernal, el estival y los feriados largos, como el de Semana Santa. Vinculado a este territorio serrano se encuentra el Parque Provincial Ernesto Tornquist, el cual fue creado en el año 1937 para proteger el pastizal natural serrano y constituye uno de los principales atractivos turísticos de la región.

Por otro lado, la población estable de la región también se ha incrementado notablemente en los últimos años, contribuyendo al aumento en la demanda de recursos (Delgado, 2012). Se considera que un mejor entendimiento respecto del efecto que los cambios en el uso del suelo pueden ejercer a nivel hidrológico, permitirá mejorar la estimación de sus consecuencias hidrológicas (Woldesenbet et al., 2017), contribuyendo al manejo sustentable de los recursos, así como a la planificación de un futuro ordenamiento territorial. Entendiendo al ordenamiento territorial como un instrumento de planificación del desarrollo sostenible, el cual tiene por objetivo la adecuación de las actividades económicas en los espacios geográficos más recomendables, buscando el equilibrio entre la mejor calidad de vida de la población y la optimización del uso sostenible de los recursos naturales (Carlevari y Carlevari, 2007). Dentro de este marco, el turismo como actividad productiva es un agente activo y en desarrollo, mundialmente reconocido como una de las actividades económicas más rentables.

Por lo expuesto anteriormente es que el objetivo del presente trabajo fue estimar la variación temporal de la demanda hídrica para consumo humano en varias localidades de la comarca serrana bonaerense.

MÉTODOS

Disponibilidad hídrica

A partir de datos pluviométricos mensuales registrados en el Partido de Tornquist (período 1982-2018) cuya fuente corresponde a la Cooperativa Rural Limitada - Los Vascos Cereales, aportados por el Ing. Agr. Ponciano Cárdenas (M.A.A.), se calculó la precipitación media anual y mensual, así como su tendencia.

Se realizó una recopilación bibliográfica de trabajos científicos donde se presentan balances hídricos para la región, tales como Casado et al. (2007), Delgado (2012), Guzmán Guaraca (2020).

Población estable y afluencia turística

Se realizó un análisis demográfico para la estimación del crecimiento poblacional en los centros urbanos de Saldungaray, Sierra de la Ventana, Tornquist, Villa La Gruta y Villa Ventana (ver Fig. 1), utilizando los datos poblacionales provenientes de censos oficiales correspondiente al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2020), y aplicando los métodos de Tasa Geométrica Decreciente (TGD) y Proyección Demográfica por Ajuste Lineal (ALTH), los cuales se describen a continuación según la metodología recomendada del Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSa).

La proyección poblacional se realizó para los años 2020 y 2030.



Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (elaborado a partir de Google Earth).

 ISBN 978-987-1323-66-1

Proyección Demográfica por Ajuste Lineal de la Tendencia Histórica (ALTH)

La proyección demográfica de cada localidad por ALTH se efectuó aplicando la recta de ajuste resultante de la regresión lineal de los valores de población total registrados en los últimos tres censos. La población futura se obtuvo con la Ec. 1.

$$P_n = a + b.\text{n} \qquad (1)$$

Donde P_n es la población total al año dado (número de habitantes), n es el número de años medidos desde el año calendario inicial de la proyección hasta el año calendario en análisis; a y b son coeficientes de la recta de ajuste y se obtienen aplicando el método de mínimos cuadrados.

El principio de este método es que la recta que mejor se ajusta a un conjunto de datos que muestran una ordenación de tendencia lineal, es aquella para la cual la suma de los cuadrados de los residuos es mínima. Se denomina residuo a la diferencia entre un valor estimado y un valor observado.

Proyección Demográfica por Tasa Geométrica Decreciente (TGD)

De acuerdo con el ENOHSa, el método de TDG es comúnmente empleado en localidades que han sufrido un aporte inmigratorio o un incremento poblacional significativo en el pasado reciente, debido a factores que generan atracción demográfica tales como la instalación de parques industriales, mejores niveles de ingreso y/o calidad de vida, nuevas vías de comunicación, entre otros, y cuyo crecimiento futuro previsible sea de menor importancia. En el caso en estudio se asocia a la actividad económica local, generada principalmente a partir del turismo.

El método utiliza para la proyección futura la expresión geométrica de la Ec.2.

$$P_n = P_o(1+i)^n \qquad (2)$$

Donde, P_n es la estimación de población al año "n"; P_0 es la población base (cantidad de habitantes), que por lo general corresponde al último censo; i es la tasa media anual de proyección.; n es el número de años transcurridos entre la población base y el año de proyección.

Este método define la tasa media anual a emplear basándose en un análisis de las tasas medias anuales de los dos últimos períodos inter-censales, por lo tanto, se toman como punto de partida los valores extraídos de los tres últimos censos del INDEC (1991-2001-2010).

Las tasas medias anuales históricas se calculan a través de las Ec. 3 y 4.

$$i_I = \sqrt[n_1]{\frac{P_2}{P_1}} - 1 \quad (3)$$

$$i_{II} = \sqrt[n_2]{\frac{P_3}{P_2}} - 1 \quad (4)$$

Donde,

i_I = Tasa media anual de variación de la población durante el penúltimo período censal.

i_{II} = Tasa media anual de variación de la población durante del último período censal.

P_1 = Número de habitantes correspondientes al primer Censo en estudio.

P_2 = Número de habitantes correspondientes al penúltimo Censo en estudio.

P_3 = Número de habitantes correspondientes al último Censo.

n_1 = Número de años del período censal entre el primero y segundo Censo.

n_2 = Número de años del período censal entre el segundo y el último Censo.

Para definir la tasa con que se proyectó en cada período, se compararon tasas i_I e i_{II}. Si i_{II} es mayor que i_I se toma el promedio de ambas y en caso de ser menor se adopta el valor de la tasa i_{II}. Una vez definidas las tasas que se utilizaron para la proyección se aplicó para cada período la expresión general.

De forma complementaria, se analizó la variación en el flujo de turismo a lo largo del año, de modo de poder discriminar su incidencia temporal en períodos de recesos y en fines de semana largo. Según el ENOHSa, en aquellas localidades donde se produzcan variaciones temporarias de población durante el año (debido al turismo o a determinadas actividades temporarias) se debe estudiar la situación existente (capacidad de alojamiento, afluencia de turistas, demanda de trabajadores temporarios, etc.) y definir la población temporaria actual, el período en el que ocupa la localidad y la distribución espacial de la misma. Asimismo, se deben analizar las tendencias de evolución de la actividad que da origen a esa población temporaria y formular las hipótesis de proyección y distribución espacial de la misma acordes con dichas tendencias, dentro del período de diseño.

Estimación de la demanda hídrica para consumo

La demanda hídrica (Dn) para consumo humano fue estimada para las cinco localidades en estudio, a partir del cálculo del consumo medio diario por habitante, de acuerdo con lo establecido en las regulaciones del ENOHSa.

Se denomina consumo medio diario de agua potable o dotación diaria efectiva, a la cantidad de agua promedio consumida en el año n por cada habitante servido, y se expresa según la Ec.5.

$$D_n\left(lts/hab\cdot día\right) = \frac{Consumo\ residencial\ en\ el\ año\ n}{población\ total\ servida\ en\ el\ año\ n} = \quad (5)$$

Para su estimación se tuvo en cuenta la variación registrada en la población estable a nivel regional, así como sus proyecciones a futuro, incluyendo además las demandas adicionales generadas por los picos de afluencia turística.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados alcanzados por el análisis de los datos pluviométricos mensuales locales se presentan en la Fig. 2, siendo el período más húmedo entre octubre y marzo.

La precipitación anual para el Partido de Tornquist (período 1982-2018) se expresa en la Fig. 3, estimándose una precipitación media anual de 778,6 mm. El año de mínimo valor pluvial fue el 2003 alcanzando 513 mm, mientras que para el año 1992 llovieron 1224 mm, siendo el mayor valor del período analizado. En particular, como se muestra en la Fig.2, el año 2003 presentó la mayor cantidad de lluvia sólo durante el último trimestre, mientras que en el año 1992 los máximos ocurrieron en el primer trimestre del año.

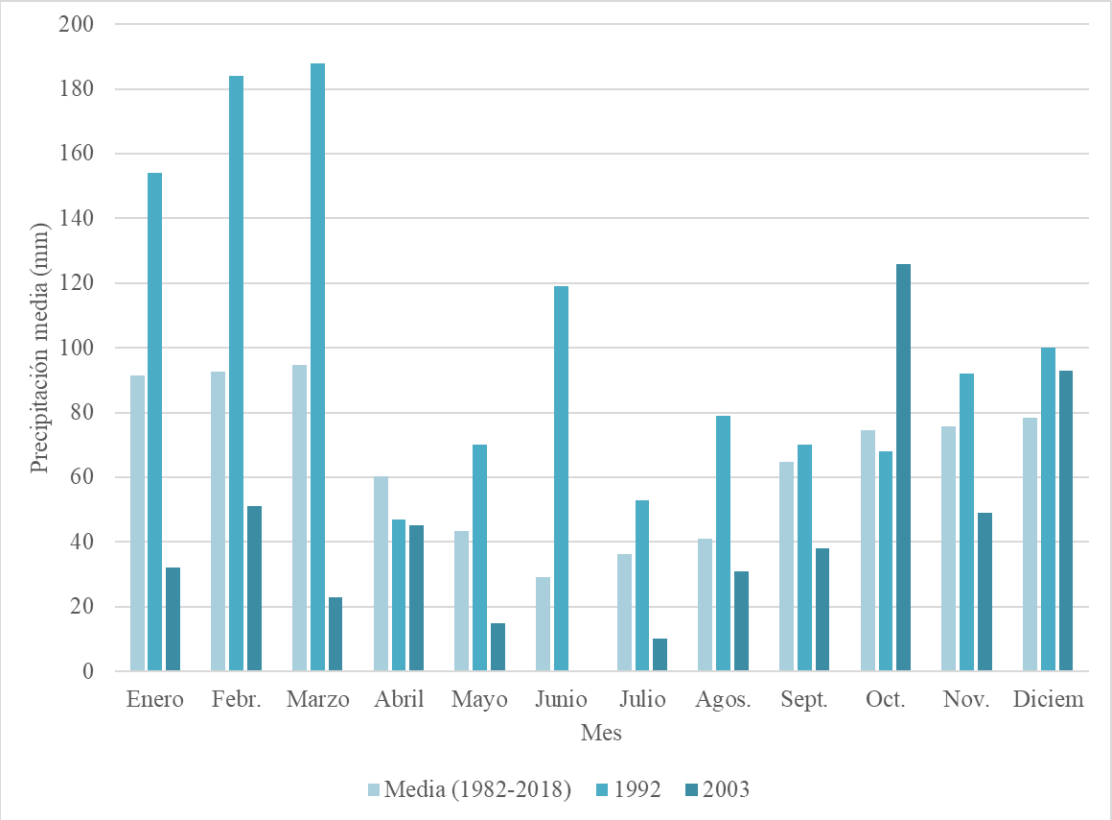


Figura 2. Precipitación media mensual (1982-2018) y de los años 1992 (mínima precitación anual) y 2003 (máxima precipitación anual).

En la Figura 3 se presenta la precipitación total anual para el periodo 1982 - 2018, donde se visualiza una tendencia negativa de ocurrencia en el registro, lo cual coincide con los resultados alcanzados por Delgado (2012) para el período 1980 - 2006, utilizando datos provenientes de otras estaciones meteorológicas de la región.

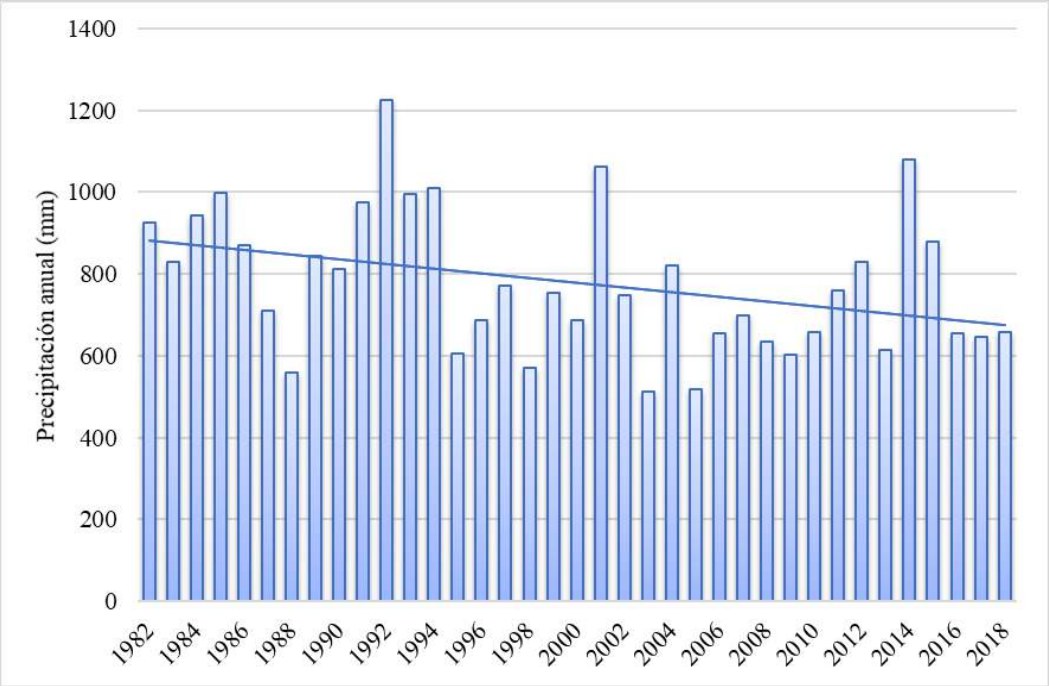


Figura 3. Precipitación total anual del período 1982-2018 con línea de tendencia.

A partir del análisis de la tendencia climática se observó una disminución promedio del 16% en los últimos tres años (2016-2018), respecto del valor medio del período.

Los balances hídricos obtenidos a partir de bibliografía refieren a la disminución de precipitaciones, así como a la ocurrencia de balances hídricos negativos. Casado et al. (2007), al analizar la variación de la disponibilidad hídrica en una cuenca específica enmarcada en la Comarca Serrana, alegan que el déficit hídrico resultante de períodos secos se prolonga en el tiempo más allá de la caída de las primeras lluvias que caracterizan el inicio del período húmedo. Dichos autores resaltan que la sucesión de períodos húmedos y secos de un año a otro es frecuente en el área. Por su parte, Guzmán Guaraca (2020), al calcular los balances a partir de datos provenientes de distintas estaciones meteorológicas de la región (período 1988-2017), detecta para el último decenio (2008-2017) la incidencia de los mayores períodos de consumo de reserva útil.

Tabla I. Datos censales para las localidades estudiadas.

Localidad	**Datos censales INDEC**		
	1991	**2001**	**2010**
Saldungaray	1.210	1.292	1.351
Sierra de la Ventana	895	1.514	2.165
Tornquist	5.635	6.066	6.473
La Gruta	8	41	52
Villa Ventana	100	446	609
Total	7.848	9.359	10.650

En lo que hace a la variación demográfica, en la Tabla I se presenta la población de las cinco localidades analizadas según los censos nacionales de los años 1991, 2001 y 2010, representando su suma el 97% de la población total del partido de Tornquist.

Se analizó el grado de ajuste de la población censada de cada localidad a las dos proyecciones realizadas, para determinar la de mejor representatividad. La Tabla II presenta las proyecciones calculadas por ambos métodos y el valor finalmente adoptado. La Figura 4 evidencia el crecimiento poblacional registrado de acuerdo con los últimos tres censos nacionales, y su tendencia proyectada hasta el año 2030.

Tabla II. Proyecciones poblacionales (en habitantes): años 2020 y 2030.

Localidad	**Proyección lineal**		**Tasa Geo. Dec.**		**Valor adoptado**	
	2020	**2030**	**2020**	**2030**	**2020**	**2030**
Saldungaray	1.429	1.503	1.420	1.492	1.424	1.497
Sierra de la Ventana	2.815	3.483	3.221	4.793	3.221	4.793
Tornquist	6.911	7.352	6.957	7.478	6.934	7.415
La Gruta	79	102	68	88	79	102
Villa Ventana	907	1.176	861	1.217	884	1.196
Total	12.140	13.615	12.527	15.068	12.542	15.004

En Sierra de la Ventana, el método de las Tasas Geométricas Decrecientes presentó un mejor ajuste, en La Gruta esto se dio para el método de Proyección Lineal, y en las tres localidades restantes ambos ajustes resultaron similares, adoptando el promedio de los valores calculados (ver Fig.4 y Tabla II).

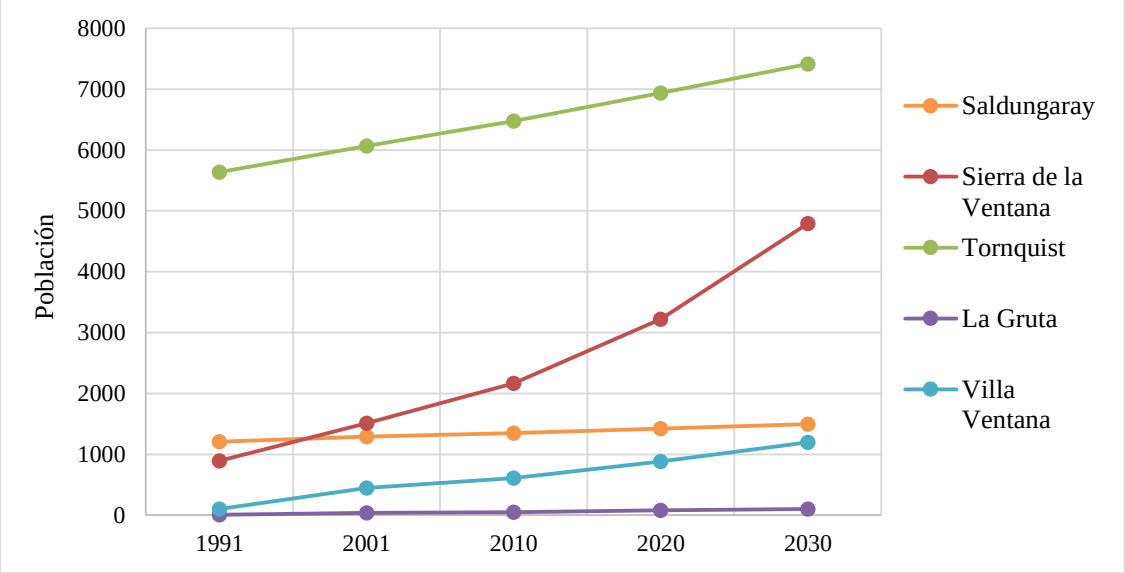


Figura 4. Población censada y proyectada.

A partir del análisis de la variación demográfica se determinó un 35,7% de aumento en la población en el período censado, y a su vez un 40,9 % de aumento para el período proyectado.

A partir de los resultados alcanzados en la estimación del consumo medio diario por habitante, de acuerdo con lo establecido en las regulaciones del ENOHSa, para poblaciones con menos de 5.000 habitantes y sin medidores de consumo de agua, se consideró una demanda hídrica para consumo humano de 200 l/hab.día, dotación diaria efectiva (Dn). La variación en la demanda de recurso se expresa como caudal medio diario anual (l/d) en la Tabla III, obtenido a partir de multiplicar la cantidad de habitantes de cada localidad por Dn.

Tabla III. Valores estimados de caudal medio diario anual (l/d).

Localidad	**Caudal medio diario anual (l/d)**				
	1991	**2001**	**2010**	**2020**	**2030**
Saldungaray	242.000	258.400	270.200	284.823	299.480
Sierra de la Ventana	179.000	302.800	433.000	644.287	958.672
Tornquist	1.127.000	1.213.200	1.294.600	1.386.807	1.482.951
La Gruta	1.600	8.200	10.400	15.736	20.403
Villa Ventana	20.000	89.200	121.800	176.754	239.289
Total	1.569.600	1.871.800	2.130.000	2.508.406	3.000.795

Hasta aquí para las proyecciones poblacionales y de demanda hídrica se tuvo en cuenta solamente a la población asentada en las distintas localidades de la Comarca Serrana, por lo tanto, si consideráramos además los picos de turismo que recibe la región, la demanda hídrica se vería aún más acentuada.

En cuanto al incremento de la población estacional debido al turismo, según la Secretaría de Turismo del Municipio de Tornquist y el Departamento de Estadísticas Turísticas de la Dirección de Desarrollo y Calidad Turística, de la Provincia de Buenos Aires, el mayor porcentaje de ocupación de plazas disponibles durante el año ocurre para el fin de semana largo de Semana Santa, alcanzando en la mayoría de los casos el 100%. Por otro lado, durante enero de 2020 la ocupación varió entre 46 y 70% según la localidad. La cantidad de plazas disponibles actualmente para cada localidad se presenta en la Tabla IV (Secretaría de Turismo de Tornquist, 2020), junto con la estimación de las plazas ocupadas, obtenidas al considerar los porcentajes de ocupación.

Cabe mencionar que, dada la falta de información sobre la tendencia de aumento en la cantidad de plazas turísticas en la zona, y las variaciones ocasionadas a raíz de la Pandemia COVID-19, se estudió sólo la demanda turística con los valores actuales, años 2019-2020.

Tabla IV. Plazas turísticas disponibles y ocupadas (Fuente: Secretaría de Turismo de Tornquist) y demanda hídrica estimada.

Localidad	Plazas dis.	Plazas ocupadas		Caudal medio diario anual (l/d)	
	Año 2020	Enero 2020	Sem. Sta. 2019	Enero 2020	Sem. Sta. 2019
Saldungaray	8	5	8	1.000	1.600
Sierra de la Ventana	1.587	1.000	1.587	200.000	317.400
Tornquist	318	147	318	29.400	63.600
La Gruta	84	51	84	10.200	16.800
Villa Ventana	1.147	803	1.147	160.600	229.400
Total	3.144	2.006	3.144	401.200	628.800

La Figura 5 presenta una tendencia creciente de la demanda hídrica de la población estable (en la línea con marcadores). Para el año 2020 se presenta además el valor de la demanda turística actual (junto con el de la población estable para el año 2020), tanto para el mes de enero como para Semana Santa.

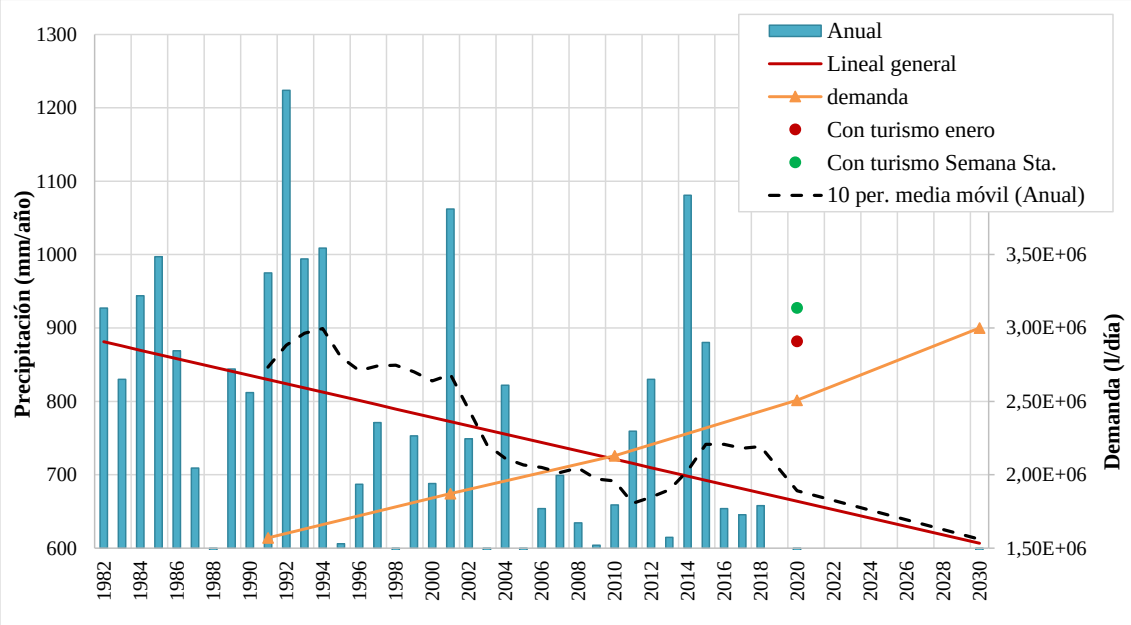


Figura 5. Relación precipitación – demanda.

En base al análisis conjunto de los resultados obtenidos se observa una relación inversa entre las estimaciones de consumo y disponibilidad hídrica en la región. Esta diferencia se ve aún más incrementada cuando se tiene en cuenta la demanda adicional de recurso generada por la concentración de afluencia turística en determinados períodos.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados alcanzados se pudo demostrar la relación inversa que existe entre la demanda de recurso hídrico por parte de la población local y la disponibilidad del mismo a nivel regional en la Comarca Serrana. Esta situación se hace aún más

evidente cuando se incorpora al análisis el turismo, considerado un actor de gran relevancia en los últimos años.

En ese caso, y más aún al considerar que su afluencia se concentra principalmente en dos épocas muy características (receso de verano y Semana Santa), es que la necesidad de una correcta planificación de las actividades en el territorio se torna aún más evidente, de modo de asegurar una correcta provisión del recurso tanto en la actualidad como en el corto y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado "Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense", del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Carlevari I. y R. Carlevari. *La Argentina. Geografía económica y humana.*14° edición. Alfaomega grupo editor. 543 pp. (2007).

Casado, A., Gil, V. y Campos, M.A. Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario, Buenos Aires, Argentina. *Huellas,* 11: 9-26. (2007).

Delgado, M. I. *Comportamiento hidrológico en ambientes serranos. Estudio de caso cuenca del Arroyo Belisario. Provincia de Buenos Aires.* Tesis Doctoral en Ingeniería. FCEIA, Universidad Nacional de Rosario. Pp. 200. (2012).

Guzmán Guaraca, A. *Localización histórica/potencial de humedales en la cuenca serrana del Río Sauce Chico y su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos.* Tesis de Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. FCAyF, Universidad Nacional de La Plata. Pp. 132. (2020).

INDEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Censos de Población. https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel3-Tema-2-41 (2020).

Irmak, S. Nebraska water and energy flow measurement, modeling, and research network (NEBFLUX). *Transactions of the ASABE*. Vol.53(4): 1097-1115. (2010).

OMS. Organización Mundial de la Salud. *Vision 2030, The resilience of water supply and sanitation in the face of climate change.* Technical report. Pp 47. (2010).

Secretaría de Turismo de Tornquist.. Plazas disponibles por localidad. www.sierrasdelaventana.tur.ar (2020).

Woldesenbet, T.A., Elagib, N.A., Ribbe, L., Heinrich, J. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sci. Total Environ.* 575, 724–741. (2017).

IMPACTO DE LAS ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN SATELITAL EN LOS CAUDALES DEL RÍO URUGUAY

Díaz G. M.[bc], Doyle M. E.[ab] y Chavez L. M.[c]

[a] *Centro de investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA, UMIIFAECI, ARGENTINA*
[b] *Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA, ARGENTINA*
[c] *Servicio Meteorológico Nacional, ARGENTINA*

e-mail: doyle@cima.fcen.uba.ar

RESUMEN

Las inundaciones son los eventos hidrológicos que mayor impacto causan a nivel global. Por lo tanto, su predicción es crucial para la prevención de desastres. En este sentido, los modelos hidrológicos son una herramienta útil para monitorear en forma continua las condiciones hidrológicas de una región. Además de una buena calibración y validación del modelo, es necesario contar con información de calidad en la región de interés. Una alternativa para suplir la baja densidad de observaciones pluviométricas es utilizar las estimaciones de precipitación satelital para alimentar al modelo. En este trabajo evaluamos la representación de los eventos de precipitación extrema diaria en las estimaciones satelitales en comparación con observaciones y el impacto que tienen en los caudales. Para ello se calibró y validó el modelo hidrológico semi-distribuido Variable Infiltration Capacity (VIC) de la Universidad de Washington en la cuenca del Río Uruguay. Las observaciones de precipitación consideradas para forzar el modelo fueron las de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y las de la estimación satelital de lluvia de la misión satelital TRMM. Para la evaluación del modelo, se consideraron los registros de caudal de la estación de Concordia, Entre Ríos. Al calibrar el modelo VIC (1999-2004) a escala diaria, en base a observaciones del SMN, se obtuvieron resultados de RMSE = 2475 m^3seg^{-1} y Nash Sutcliffe (NS) = 0.68, a diferencia de la calibración producida por TRMM, la cual generó estadísticos de RMSE = 3143 m^3seg^{-1} y NS = 0.48. Sin embargo, para el período de calibración, el valor medio de las series de caudal se encuentra mejor representado por la simulación forzada por TRMM que forzada por SMN, no así en el desvío estándar. En términos generales, el caudal observado es sobreestimado por el modelo al ser forzado con la precipitación estimada por TRMM.

Palabras Clave: precipitación, TRMM, caudales, río Uruguay, VIC.

INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos son una herramienta apropiada para abordar varios de los problemas asociados a la gestión del agua en particular cuando la red de observaciones de precipitación y caudal no es muy densa (Collischonn et al., 2007). Asimismo, los pronósticos de alta calidad con suficiente antelación son un insumo que beneficia la generación de recursos hidroeléctricos y disminuye los riesgos asociados a la operación de las represas (Collischonn et al., 2005). En la actualidad en muchos países se han hecho grandes avances en la generación de pronósticos de caudales, incluso a escala estacional y subestacional (Schick et al., 2019), siendo el modelo semidistribuido VIC uno de los que se ha utilizado (Yuan y Wood 2012).

La precipitación es el principal forzante del ciclo hidrológico en superficie y por tanto el principal insumo en los modelos. Es por ello que es de vital importancia que esta información sea de alta calidad y cantidad. Sin embargo, la red de estaciones

pluviométricas disponibles no siempre cumple con estos requisitos y es necesario entonces acudir al uso de información alternativa, como son las estimaciones de precipitación a partir de información satelital. Estas estimaciones de precipitación tienen la ventaja de abarcar distintas escalas tanto espaciales como temporales, lo que las hace adecuadas para aplicaciones hidrológicas (Joyce et al., 2004, Huffman et al., 2007, 2001). Asimismo, es importante tener en cuenta que también son propensas a varias fuentes de incertidumbre, como son errores de muestreo y recuperación, que pueden afectar los resultados de los caudales modelados (Demaria et al., 2014).

El litoral argentino es una región rica en recursos hídricos que requiere de un sistema de monitoreo y pronóstico para el mejor aprovechamiento de los mismos. En este sentido, el Servicio Meteorológico Nacional comenzó a trabajar con el modelo VIC (Liang et al., 1994, 1996) y a evaluar su desempeño en la cuenca del Río Uruguay (Cerrudo et al., 2016; Díaz et al., 2019). Hay varios trabajos que han analizado la propagación de los errores en las estimaciones de precipitación en las predicciones de caudales de distintas cuencas alrededor del mundo (Hossanin y Anagnostou 2004, Gebregiorgis y Hossain 2013), incluyendo en Sudamérica los ríos Amazonas (Collischonn et al., 2008) e Iguazú (Demaria et al., 2014). Sin embargo, aún no se ha evaluado el impacto de las estimaciones de las precipitaciones, a través de sensores remotos, en los caudales del Río Uruguay, tema que abordaremos en este trabajo.

MÉTODOS

Región de estudio

El río Uruguay es uno de los más importantes de la región sur de Sudamérica, junto con el río Paraná y el río Paraguay. Sus cuencas, junto con la cuenca propia del Río de la Plata, conforman la Cuenca del Plata. El río Uruguay nace en la confluencia de los ríos Canoas y Pelotas, al sudeste de Brasil y cuenta con un recorrido aproximado de 1800 km hasta su desembocadura en el Río de la Plata. En su trayectoria, las aguas del río Uruguay circulan por los estados de Santa Catarina y Río Grande del Sur en Brasil; las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos en Argentina; como también por los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Río Negro, Soriano y Colonia en Uruguay. El área de aporte aproximado de la cuenca es de 365.000 km^2 y la descarga promedio en Concordia es de 5299m^3 s^{-1} para el período 1950-2017. El rango de elevaciones de la cuenca varía entre 0-50 m en su salida y 1000-1500 m en sus puntos más elevados (ver **Fig. 1**) hacia el noreste. Algunas represas hidroeléctricas se encuentran emplazadas a lo largo del río Uruguay, entre ellas, la de Salto Grande, una de las más importantes en la región. Por lo tanto, conocer la dinámica de aguas (crecidas y bajantes) en la cuenca, es vital tanto para el consumo de las poblaciones y la prevención de fenómenos de alto impacto hidrológico (inundaciones y sequías), como así también para la generación de energía.

Con el fin de entender de mejor manera las crecidas y bajantes en el río Uruguay, es vital la utilización de modelos hidrológicos que expliquen de forma precisa los procesos hidrológicos involucrados en los distintos mecanismos que producen estos tipos de eventos, tanto de exceso como de déficit hídrico. Por lo tanto, es importante analizar la confiabilidad del modelo seleccionado, en primer lugar a través de una calibración y validación del mismo y luego analizando la representación de los caudales al ser forzado con variadas fuentes de información.

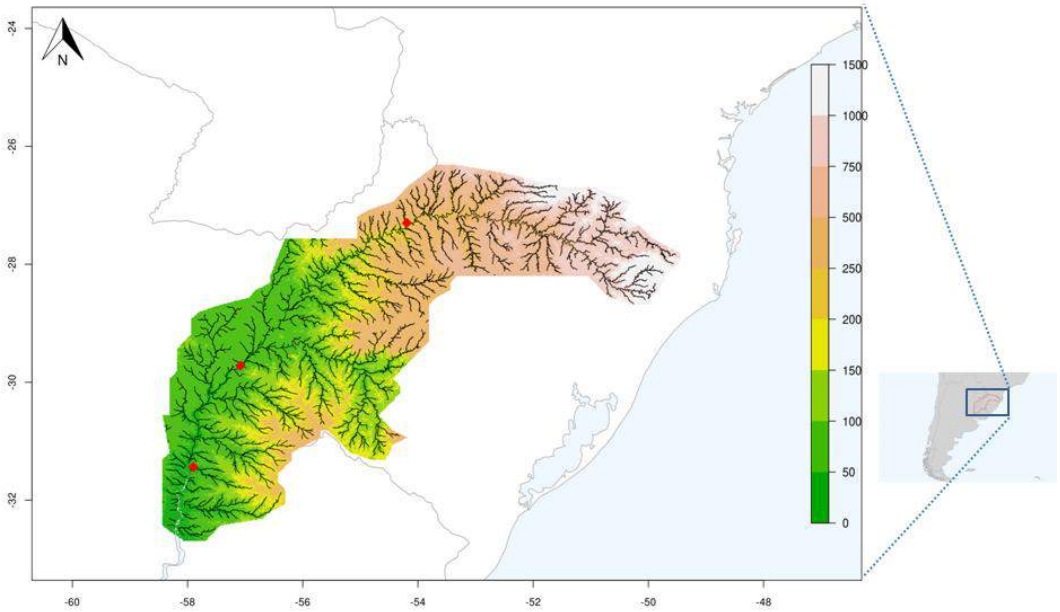


Figura 1: Región de estudio de la cuenca del río Uruguay con la representación de sus elevaciones en metros (sombreado color) y la red de drenaje (líneas negras) producida a partir de las pendientes. En puntos rojos, de norte a sur, se encuentran los puertos de El Soberbio, Paso de los Libres y Concordia, delimitando la cuenca alta, media y baja, respectivamente.

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC, https://vic.readthedocs.io/en/master/), es un modelo semidistribuido desarrollado en la Universidad de Washington (Liang et al. 1994, 1996), que ha sido implementado satisfactoriamente en cuencas a lo largo de todo mundo (Tesemma et al. 2015; Yong et al. 2010; Xue et al. 2015) incluyendo la región de la Cuenca del Plata (Demaria et al., 2014; Su et al., 2007, Saurral 2010, Saurral et al., 2013). El modelo VIC representa, en cada punto de retícula de forma independiente, distintos procesos hidrológicos como ser, la intercepción de la precipitación por parte de la vegetación, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial y el flujo base. Asimismo, por cada punto de grilla, se definen 3 espesores de suelo, 10 cm (superficial), 30 cm y 100 cm (subsuperficial) contando, además, con la ventaja de poder describir la variabilidad a nivel de subgrilla de características tales como el tipo de vegetación y el contenido de humedad de suelo. El modelo puede ser utilizado en modo balance de agua o balance de energía, siendo este último más robusto en la representación de los flujos, pero más costoso a nivel computacional, además de requerir una mayor representación espacial de variables atmosféricas radiativas. Un detalle mayor de las características y ecuaciones aplicadas en el modelo pueden encontrarse en Gao et al. (2009).

Para lograr la mejor representación posible de los caudales por parte del modelo es esencial realizar un trabajo de calibración y validación del mismo, a través del ajuste de una serie de parámetros. Existen diversos métodos de calibración, desde métodos manuales de prueba y error a programas sofisticados que determinan los valores de los parámetros por medio de técnicas estadísticas. En este trabajo la selección de parámetros a calibrar (**Tabla I)** se realizó en base al estudio de sensibilidad de parámetros efectuado por Demaria et al. (2007).

De forma desacoplada, el VIC cuenta con un modelo de ruteo basado en funciones de transferencia lineal para simular las descargas o caudales de ríos y arroyos (Lohmann et al., 1996, 1998; Gao et al., 2009). El modelo de ruteo transfiere los flujos horizontales generados por el VIC, en base a la pendiente del terreno generada por un Modelo de Elevación Digital, y resuelve la magnitud del caudal para cualquier punto de cierre que se defina en el dominio de la cuenca.

Tabla I: Descripción de los parámetros del VIC modificados para la calibración.

Parámetro del modelo	Unidades	Significado físico del parámetro
Binf	-	Parámetro para la curva de infiltración superficial
Dsmax	mm día^{-1}	El máximo flujo base que puede ocurrir del espesor más profundo
Ws	fracción	Fracción de humedad del suelo (del espesor más profundo) en el momento en que comienza un flujo base no lineal
Ds	fracción	Fracción de Dsmax en que comienza el flujo base no lineal
Exp	fracción	Exponente de la ecuación hidráulica de Brooks-Corey

Datos

Las variables meteorológicas mínimas necesarias para forzar el modelo VIC son los valores diarios de precipitación y de temperatura máxima y mínima. Una mayor densidad de observaciones dentro de la cuenca de estudio y en alrededores cercanos, favorecerá la mejor representación de los procesos asociados al ciclo hidrológico, y por tanto los caudales en los puntos de cierre del análisis.

En este trabajo se utilizaron las observaciones diarias de precipitación provenientes de las estaciones meteorológicas convencionales de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Sistema de Telecomunicaciones Global (GTS, por sus siglas en inglés, https://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/GTS/index_en.html) en el periodo 1998-2015, que incluyen datos de las redes de los servicios meteorológicos de Brasil y Uruguay. Debido a que los datos que se utilizaron son los que el SMN cuenta en su modo operativo en tiempo real, hay una variante de faltantes día a día que depende del plan diario de labor de cada una de las estaciones. Estos faltantes no se encuentran contabilizados en este trabajo. Dado que el modelo trabaja a partir de información distribuida sobre una retícula, se utilizó el método de Kriging para interpolar los forzantes meteorológicos a una grilla de 1/8°. Para los datos de temperatura máxima y mínima se utilizaron los datos provenientes de los reanálisis de ERA-INTERIM (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim) los cuales se interpolaron a la grilla de 1/8° mediante el método de interpolación bilineal.

Los productos de precipitación del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, https://gpm.nasa.gov/missions/trmm) surgen de una misión conjunta entre las agencias NASA (USA) y JAXA (Japón) para monitorear y estudiar la precipitación tropical. El análisis de precipitación multisatelital TRMM (TMPA) consiste en dos productos: uno en tiempo casi real (3B42RT) adecuado para monitoreo y otro (3B42) con estimaciones más precisas y más apropiadas para la investigación (Liu 2015). En este trabajo se utilizaron los valores diarios de 3B42 disponibles en una grilla global con resolución 0.25° x 0.25° en la región correspondiente a la cuenca del Uruguay. En este caso los datos fueron llevados a la misma retícula que las observaciones usando una interpolación bilineal para

el mismo período. En las simulaciones realizadas utilizando las estimaciones satelitales de precipitación se consideraron las mismas temperaturas máximas y mínimas que para la simulación con observaciones.

Los caudales que surgen de las distintas simulaciones con el modelo se contrastaron con los valores de caudal medio diario del puerto Concordia obtenidos de https://alerta.ina.gob.ar/pub/mapa para el período de tiempo analizado, con la excepción del año 2009, año con datos faltantes en el registro de caudal.

Estudio del período de calibración, validación y evento de crecida

Las simulaciones del VIC y el modelo de ruteo se realizaron desde 1998 a 2015. El período de calibración considerado fue 1999-2004 y el período de validación 2005-2015. El año 1998 fue eliminado del análisis para permitirle al modelo llegar a un estado de equilibrio (spin-up). En primer lugar, se calibró el modelo a partir de los datos de la red del SMN y se analizaron las diferencias de las simulaciones generadas con los datos del SMN y de TRMM. En segundo lugar, se realizó una segunda calibración con los datos TRMM y se estudió si hubo una mejora con respecto a la primera calibración. En la **Tabla II** se detallan las simulaciones realizadas para este estudio. Por último, se analizó la representación de la precipitación de las distintas fuentes (SMN y TRMM) y la dinámica del agua, ante un evento específico de crecida del río Uruguay en el puerto Concordia.

Tabla II: Simulaciones realizadas con el modelo VIC.

Simulación	Datos de Precipitación	Descripción
SMN-TRMM	TRMM	Simulación con datos TRMM usando el modelo calibrado con precipitación del SMN
SMN-SMN	SMN	Simulación con datos SMN usando el modelo calibrado con precipitación del SMN
TRMM-TRMM	TRMM	Simulación con datos TRMM usando el modelo calibrado con precipitación del TRMM

Estadísticos utilizados para la evaluación de las simulaciones

Con el fin de cuantificar la bondad del ajuste de las simulaciones del VIC, se utilizaron cuatro de los índices estadísticos más conocidos: Nash-Sutcliffe (NS), BIAS porcentual (PBIAS, por sus siglas en inglés), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación de Pearson (R). El NS determina la relación entre la varianza residual en la simulación con respecto a la varianza observada (Nash and Sutcliffe, 1970) y puede tener valores que van del rango de $-\infty$ a 1, siendo 1 una representación perfecta por parte del modelo. Los valores de NS > 0.5 son considerados aceptables, mientras que valores negativos demuestran que el modelo es peor predictor que la media observada. El PBIAS representa las diferencias relativas entre la simulación y las observaciones, el valor óptimo de PBIAS es igual a 0.0%. El RMSE mide el promedio de las diferencias al cuadrado, cuanto más próximo a 0 menor es el error. Sin embargo, no provee información de si el modelo subestima o sobrestima, esta característica es determinada por el PBIAS. Por último, el R es utilizado para definir el grado de relación lineal que existe entre la simulación y la observación. Los cuatro índices se calculan en base a las ecuaciones de **Tabla III** y fueron calculados a nivel diario. Por otro lado, también se analizaron las comparaciones entre los valores medios y desvíos de las series simuladas contra las observaciones de caudal.

Tabla III: Expresiones matemáticas de los estadísticos utilizados para la evaluación de las simulaciones en sus períodos de calibración y validación.

Ecuaciones de índices estadísticos para el ajuste		Rango de valores (unidades)
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs}^{i} - Q_{sim}^{i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs}^{i} - \overline{Q_{obs}}\right)^2}$	(1)	$-\infty$ a 1
$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{sim}^{i} - Q_{obs}^{i}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs}^{i}\right)}$	(2)	-100 a 100 (%)
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{sim}^{i} - Q_{obs}^{i}\right)^2}{n}}$	(3)	$-\infty$ a $+\infty$ ($m^3 s^{-1}$)
$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs}^{i} - \overline{Q_{obs}}\right)\cdot\left(Q_{sim}^{i} - \overline{Q_{sim}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs}^{i} - \overline{Q_{obs}}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(Q_{sim}^{i} - \overline{Q_{sim}}\right)^2}}$	(4)	-1 a 1

donde n representa el par de puntos observación-simulación, Q^{i}_{obs} es la observación para el tiempo i, Q^{i}_{sim} es la simulación VIC para el tiempo i y $\overline{Q_{obs}}$ y $\overline{Q_{sim}}$ es la media de las observaciones y de la simulación respectivamente para el período total de las simulaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulaciones VIC en base a la calibración con datos de SMN y datos de TRMM

La **Fig. 2** presenta los resultados de los caudales de las tres simulaciones en comparación con el caudal observado. El análisis de las distintas simulaciones muestra que la mejor representación de caudal surge de utilizar el modelo VIC calibrado y forzado con datos del SMN (de ahora en más SMN-SMN) (**Fig. 2b)**. La figura presenta el ajuste que existe entre los caudales simulados a los observados tanto para el período de calibración como el de validación, y se destaca que los mejores resultados se dan principalmente en el período de calibración. Al utilizar el modelo calibrado con datos SMN y forzar la simulación con las estimaciones de precipitación de TRMM (en adelante SMN-TRMM) (**Fig. 2a**), se observa que en general, durante todo el período considerado, los caudales simulados por el modelo VIC sobreestiman los valores observados. Los estadísticos utilizados para evaluar las simulaciones, indican que los caudales de SMN-SMN ajustan mejor los caudales observados que los que resultan de SMN-TRMM (**Tabla IV**) durante el período de calibración. Por otra parte, en el período de validación, ambas simulaciones disminuyen su performance, en algunos casos por más de la mitad, como lo muestra por ejemplo el índice NS (**Tabla IV**). El único estadístico que muestra una mejora entre el período de calibración y validación es el PBIAS de la simulación SMN-SMN, variando de -5.0% a 2.9%. En el caso del PBIAS, se observa que para la simulación SMN-TRMM, la diferencia entre ambos períodos es muy sutil, ya que en la calibración fue de 24.8% y en la validación, 25.0%. Dados los resultados que muestran que, al forzar con una base de datos de precipitación distinta a la utilizada para calibrar el modelo los caudales

simulados se ajustan menos a los observados, se decidió realizar una nueva calibración y ver en qué medida la nueva calibración con datos TRMM logra mejorar las simulaciones.

Los resultados de calibrar y forzar el modelo con las precipitaciones de TRMM (de ahora en más TRMM-TRMM) se presentan en la **Fig. 2c.** Se puede apreciar una clara mejora en la representación de la dinámica de agua con respecto a la simulación SMN-TRMM, tanto para el período de calibración como para el de validación. Esto también se ve representado en base a los estadísticos de la **Tabla IV**, todos los índices muestran una mejora en la simulación TRMM-TRMM, con respecto a SMN-TRMM, excepto en el período de validación para el coeficiente de correlación donde se aprecia que los valores se mantienen iguales en 0.76 (**Tabla IV**). También se observa una disminución en la performance del VIC en el período de validación con respecto al de calibración, excepto por el PBIAS, (**Tabla IV)**, donde son muy similares.

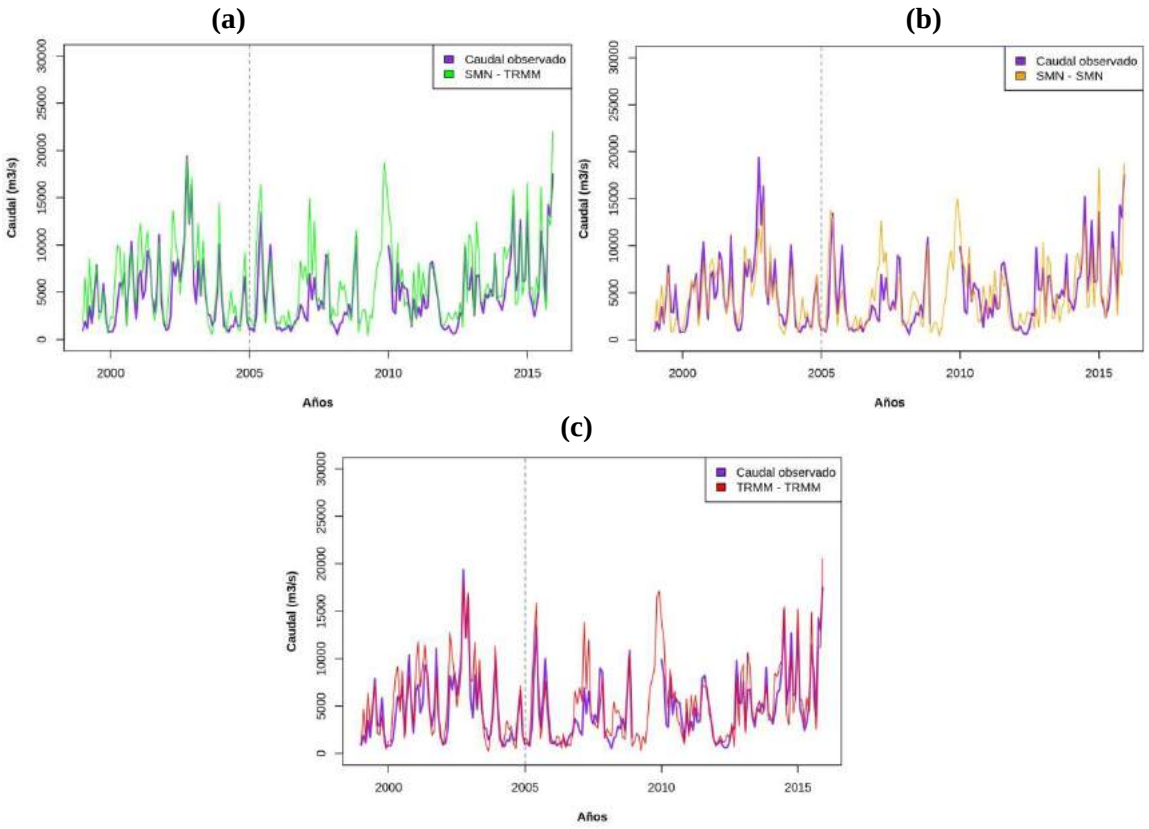


Figura 2: Evolución temporal del caudal medio mensual en m^3seg^{-1} en el período 1999 - 2015, correspondiente a: (a) simulación SMN-TRMM (línea verde), (b) simulación SMN-SMN (línea naranja), (c) simulación TRMM-TRMM (línea roja). El caudal medio mensual observado se representa en línea violeta en todas las figuras. La línea vertical punteada en el año 2005 indica la división entre los períodos de calibración (1999 - 2004) y de validación (2005 - 2015).

Tabla IV. Resultados de los estadísticos NS, PBIAS, RMSE y R correspondientes a las simulaciones realizadas. C: período de Calibración. V: período de Validación.

SIMULACIÓN	NS		PBIAS		RMSE (m^3 s^{-1})		R	
	C	V	C	V	C	V	C	V
SMN-TRMM	0.34	0.15	24.8	25.0	3554	3839	0.79	0.76
SMN-SMN	0.68	0.36	-5.0	2.9	2475	3326	0.83	0.72
TRMM-TRMM	0.48	0.32	10.6	10.0	3143	3436	0.80	0.76

Los estadísticos de la **Tabla IV** fueron calculados a escala diaria, mientras que los resultados expresados en **Figura 2** se encuentran en escala mensual, para poder destacar los períodos mejor y peor representados por las simulaciones. Por lo tanto, es esperable pensar que si los estadísticos fuesen calculados a escala mensual se obtendrían mejores resultados con respecto a los valores de **Tabla IV**.

Mirando los valores de los estadísticos de las tres simulaciones en conjunto se observan algunos resultados interesantes. Por ejemplo, en el caso del índice de NS, solo en la simulación SMN-SMN el valor superó el umbral de aceptabilidad de 0.5 para el período de calibración. Sin embargo, ninguno de los otros períodos para el resto de las simulaciones obtuvo valores negativos, esto demuestra que el modelo tiene una mejor representación que la media observada (**Tabla IV**). La peor representación, en cuanto al PBIAS, se observa para la simulación SMN-TRMM (**Tabla IV**). Sin embargo, cuando el modelo se calibra con el mismo conjunto de datos con el cual se simula luego, la mejora en el PBIAS es mayor al doble, con valores que van de 24.8% y 25.0% para SMN-TRMM a 10.6% y 10.0% para TRMM-TRMM. De todas maneras, nuevamente, el mejor PBIAS es el de la simulación SMN-SMN, mostrando que las simulaciones con TRMM tienen una peor performance en la representación de los caudales, produciendo picos mucho mayores en general (**Fig. 2**). Los valores de RMSE para todas la simulaciones y períodos son del orden de 3000 m^3 s^{-1}, nuevamente los mejores resultados son los de la simulación SMN-SMN. Con respecto a los períodos, el de calibración se encuentra mejor representado que el de validación. Más allá de que los errores son del orden de 3000 m^3 s^{-1} y el promedio histórico en el puerto Concordia es de 5299 m^3 s^{-1}, hay períodos de gran variación, siendo el desvío de la serie observada del orden de 4500 m^3 s^{-1} (**Fig. 3**). Asimismo, dado que los errores de RMSE se encuentran por debajo del desvío de la serie se consideran valores aceptables. En cuanto a los valores de R, no se observan diferencias muy importantes entre las simulaciones. De hecho, las simulaciones SMN-TRMM y TRMM-TRMM muestran una mejor representación en el período de validación, en cuanto al grado de relación lineal, con respecto a SMN-SMN (**Tabla IV**). Podemos concluir a partir de los resultados de estos índices que, a nivel diario el experimento SMN-SMN tiene la mejor simulación para el período de calibración.

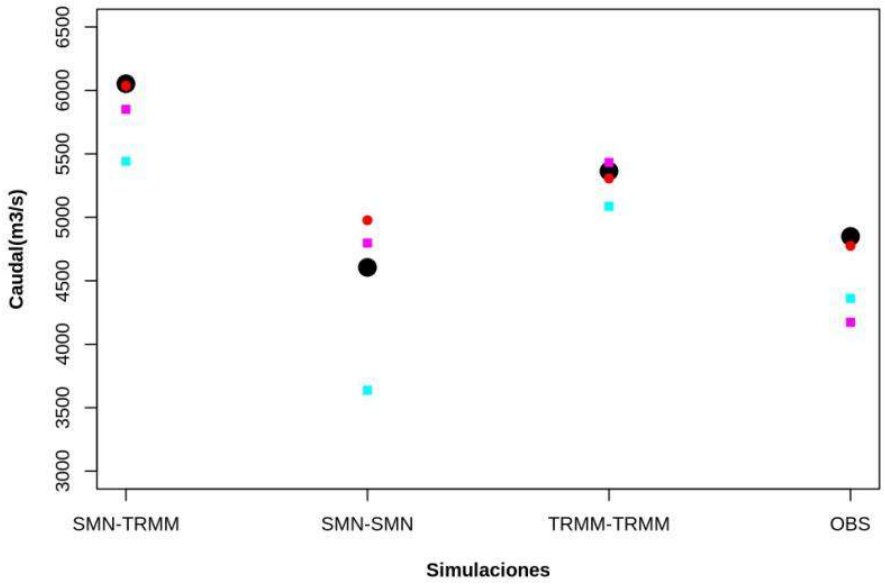


Figura 3: Media y desvío estándar de las distintas simulaciones y del caudal observado. En círculos se muestran los valores medios del período de calibración (negro) y el de validación (rojo). Los cuadrados indican desvío estándar de calibración (celeste) y de validación (magenta).

La **Figura 3** presenta los valores medios y desvíos discriminando los períodos de calibración y validación, tanto para las simulaciones como para las observaciones. De acuerdo a los resultados de estas métricas puede observarse que en términos generales, la mejor simulación es la SMN-SMN. El caudal medio observado es de 4850 m^3 s^{-1} en el período de calibración y 4768 m^3 s^{-1} en el de validación, y si bien en el primer caso el experimento SMN-SMN subestima la observación y en el segundo la sobreestima, esta simulación es la que obtiene los mejores valores medios (**Fig. 3**). Al mirar los desvíos estándar, el experimento SMN-SMN es el que subestima en mayor medida el desvío estándar respecto al observado (4361 m^3 s^{-1}) durante el período de calibración, mientras TRMM-TRMM es el que mejor se ajusta. La simulación SMN-TRMM es la que sobreestima en mayor medida la media y el desvío de los períodos tanto de calibración como de validación.

Uno de los aspectos más difíciles de simular son las crecidas. En la **Figura 4** se comparan las representaciones de 2 de los experimentos de la crecida en el puerto Concordia ocurrida en octubre 2002. Las observaciones muestran que los caudales a principios del mes eran de unos 15000m^3s^{-1} y que a partir del día 5 comenzaron a crecer paulatinamente hasta superar los 20000m^3s^{-1} alrededor del día 22. Los dos experimentos considerados TRMM-TRMM y SMN-SMN, comienzan subestimando el caudal inicial del mes de octubre, pero ambos reproducen el aumento del caudal de inicios del mes. En el caso de la simulación TRMM-TRMM comienza el día anterior y genera un pico de crecida muy intenso y rápido superando el valor observado en más de 15000m^3s^{-1}, esto estaría más que duplicando el caudal en aproximadamente 4 días. El experimento SMN-SMN, en cambio, tiene una respuesta más lenta, ya que comienza el aumento del caudal unos pocos días después y por tanto alcanza el pico un poco después, pero la tasa de crecimiento de caudal es similar a la observada (**Fig. 4**). Una segunda diferencia importante entre los experimentos y las observaciones es que los caudales siguieron aumentando y permanecieron altos por unos 10 días y comenzaron a bajar en forma lenta. El experimento TRMM-TRMM genera un pico abruptamente y de la misma manera se produce la bajante volviendo a tener rápidamente caudales por debajo de los valores

observados. El otro experimento, SMN-SMN, una vez que alcanza el pico también inicia la bajante aunque de forma más moderada. Un rasgo interesante es que durante la bajante ambas simulaciones generan ondas que no aparecen en las observaciones.

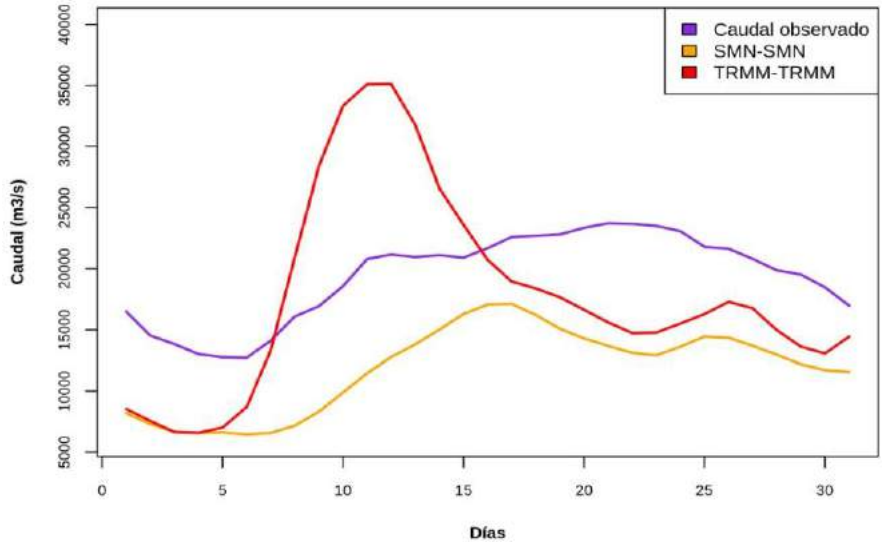


Figura 4: Evolución temporal del caudal medio diario en m^3seg^{-1} para el mes de octubre 2002, correspondiente a la: observación (línea violeta), simulación SMN-SMN (línea naranja) y simulación TRMM-TRMM (línea roja).

En base a la diferencia de picos que existe entre SMN-SMN y TRMM-TRMM, se analizaron las diferencias de precipitación entre las distintas bases de SMN y TRMM (la diferencia es igual a la precipitación de TRMM menos la precipitación de SMN) para los 9 días previos al evento de crecida detectado en la simulación TRMM-TRMM (**Fig. 5**). La cantidad de días previos seleccionados fueron elegidos en base a los resultados obtenidos en Zotelo et al. (2008) donde muestran que el periodo de respuesta en una localidad del Uruguay a precipitaciones intensas aguas arribas puede llegar a ser de nueve días.

A simple vista se puede observar que aparecen tanto diferencias positivas como negativas en la mayoría de los días. Esto podría indicar dos cosas, en primer lugar, que no ubican los sistemas de precipitación en el mismo lugar y en segundo lugar una diferencia en las cantidades de precipitación generadas. Los días 03, 05 y 07 de octubre muestran una importante diferencia positiva por encima de la cuenca. En particular para los días 03 y 05 la base de datos TRMM detecta una mayor precipitación sobre la cuenca que la base de datos del SMN, que rondan los +50 mm (**Fig. 5**). El día 07 en cambio aparecen intensos núcleos positivos y negativos señalando que ambas bases de datos detectaron intensas precipitaciones, pero los sistemas están ubicados en regiones distintas. Las precipitaciones de TRMM están muy cerca del cauce del río Uruguay más que las del SMN. Por lo tanto, la intensidad y ubicación de las precipitaciones TRMM explican que el intenso evento de crecida detectado por la simulación TRMM-TRMM sea antes que el caso SMN-SMN. Las precipitaciones medidas por la red de SMN presentan valores intensos en la región de la cuenca y en particular cerca del cauce entre los días 06 y 09 de octubre. Al ser estos más localizados terminan generando valores menores de caudal pero al perdurar en el tiempo mantienen una tasa de crecimiento similar al observado.

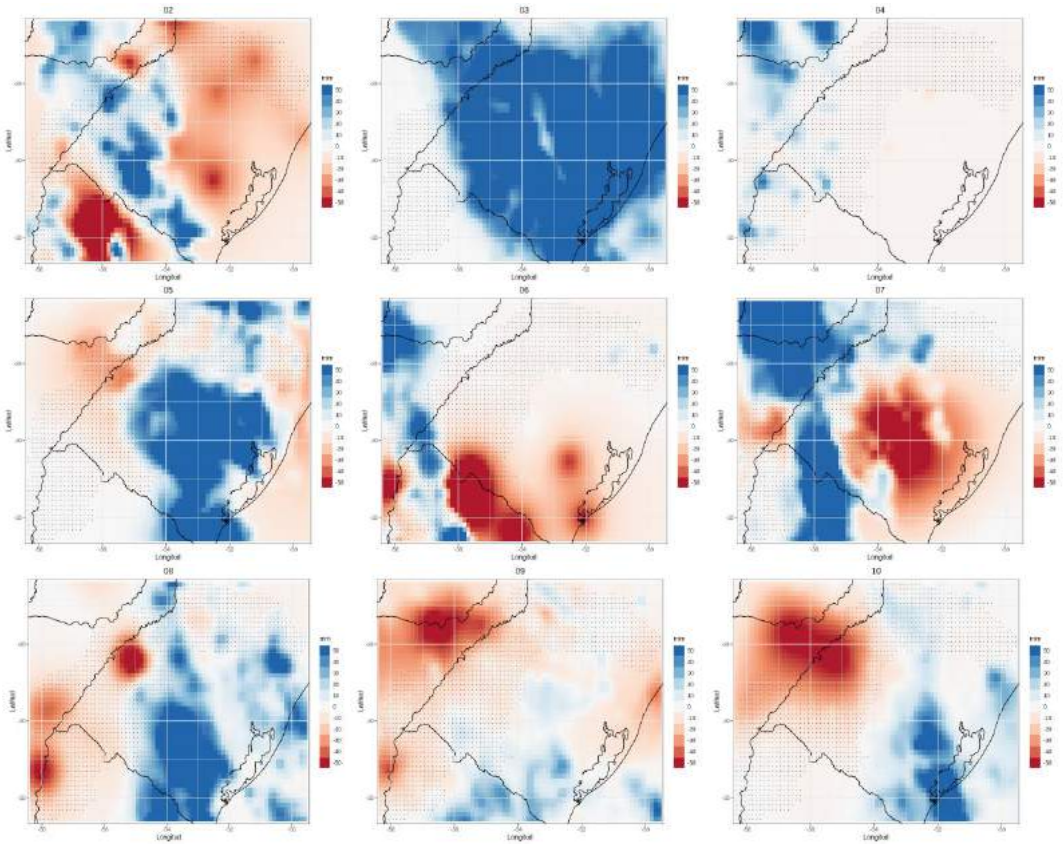


Figura 5: Diferencias de precipitación entre las bases de datos (TRMM - SMN). Fila superior: días 02 al 04, medio: 05 al 07, inferior: 08 al 10/10/2002. Los puntos muestran el área de la cuenca Uruguay. Unidades: mm.

CONCLUSIONES

La vida humana y todas las actividades económicas y sociales dependen fuertemente y afectan el ciclo hidrológico. Dentro de la rama superficial de este ciclo, la precipitación juega un rol clave, de allí la necesidad de poder monitorearla en forma continua y de la manera más precisa posible, siendo que esta condiciona otros aspectos del ciclo como la hidrología. Entre las tecnologías desarrolladas para suplir la imposibilidad de contar con redes de estaciones pluviométricas que abarquen todas las regiones terrestres, se encuentran las estimaciones a partir de sensores remotos. En este trabajo se ha evaluado el desempeño de este tipo de información en comparación con las observaciones de estaciones terrestres a través de la modelación de los caudales del Río Uruguay. En este sentido se diseñaron una serie de experimentos que involucraron tanto la corrida como la calibración del modelo considerando las precipitaciones diarias de la red de observaciones del Servicio Meteorológico Nacional incluyendo observaciones de países limítrofes y las estimaciones de precipitación satelital TRMM 3B42. Al calibrar y forzar el modelo con las precipitaciones de TRMM (simulaciones TRMM-TRMM), se encontró una mejora en la representación de la dinámica de agua con respecto a la simulación SMN-TRMM, tanto para el período de calibración como para el de validación. Todos los estadísticos calculados reflejan esta mejora en la simulación TRMM-TRMM, con respecto a SMN-TRMM, es decir al utilizar como forzante la precipitación TRMM en el modelo calibrado con las observaciones del SMN. Sin embargo, los eventos de precipitaciones intensas sobreestiman de manera significativa las precipitaciones y este

error tiene un impacto directo en la estimación de los caudales, que persiste aún al considerar solamente el producto TRMM tanto en la calibración como en la validación. Al analizar el evento de crecida de octubre 2002, pudo concluirse la importancia de dos factores en las bases de datos de precipitación para la correcta detección de un pico de caudal: 1. la correcta ubicación de máximos y mínimos y 2. el valor absoluto de estos máximos y mínimos. De lo expuesto concluimos que, para obtener buenas simulaciones de caudales es importante la evaluación previa del producto satelital a utilizar en la simulación de caudales para elegir el más adecuado para el monitoreo y pronóstico de las condiciones hídricas de una región y ajustar en base al producto elegido el modelo hidrológico. A futuro, se propone continuar analizando la performance del modelo hidrológico ante otras fuentes de precipitación satelitales (CMORPH, PERSIANN, GSMaP, IMERG, etc.) como así también ante fuentes híbridas, que mezclan tecnología satelital con observaciones in situ (CHIRPS, MSWEP, etc.).

REFERENCIAS

Collischonn W., Haas R., Andreolli I. and Tucci C.E.M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology* 305 87–98 (2005).

Collischonn W., Allasia D., Da Silva B. C. and Tucci C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall–runoff modeling. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 52(5) 878-895 (2007).

Collischonn B., Collischonn W. and Tucci C.E.M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360 (1–4), 207–216 (2008).

Cerrudo C., Díaz G., Juarez S., Flores K., Ferreira L. y Saurral R. Herramientas empleadas por el Departamento de Hidrometeorología del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el análisis del estado hídrico en Argentina. *3er Encuentro de Investigadores en Recursos Hídricos.* Instituto Nacional del Agua. Octubre 2016. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.

Demaria E.M., Nijssen B. and Wagener T. Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the variable infiltration capacity model. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 112 (D11), D11113 (2007).

Demaria E.M.C., Nijssen B, Valdés J. B., Rodriguez D. A. and Su F. Satellite precipitation in southeastern South America: how do sampling errors impact high flow simulations?, International Journal of River Basin Management, DOI: 10.1080/15715124.2013.865637 (2014).

Díaz G., Oliveri P., Meis M. y Bianchi E. Análisis preliminar del rendimiento de los modelos hidrológicos CHyM y VIC para la cuenca del río Uruguay. *IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental.* Universidad Nacional Arturo Jauretche. Diciembre 2019. Florencio Varela, Buenos Aires, Argentina.

Gao H., Tang Q., Shi X., Zhu C., Bohn T., Su F., Sheffield J., Pan M., Lettenmaier D., Wood E.F. Chapter 6 Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. *Algorithm Theoretical Basis Document, Version 1.2*, 120-173 (2009).

Gebregiorgis A.S. and Hossain F. Understanding the dependence of satellite rainfall uncertainty on topography and climate for hydrologic model simulation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote, 51 (1), 704–718 (2013)

Hossain F. and Anagnostou E.N. Assessment of current passive-microwave-and infrared-based satellite rainfall remote sensing for flood prediction. Journal of Geophysical Research, 109, D07102. doi:10.1029/2003JD003986 (2004).

Huffman G.J. and coauthors. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2 (1), 36–50 (2001).

Huffman G.J. and coauthors. The TRMM multisatellite precipitation analysis TMPA: quasi-global, multiyear, combined sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (1), 38–55 (2007).

Joyce R.J., and coauthors. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (3), 487–503 (2004).

Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F. and Burges S.J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal Geophys. Res.* 99 (D7), 14415-14428 (1994).

Liang X., Wood E.F. and Lettenmaier D.P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global Planet. Change* 13 (1-4), 195-206 (1996).

Liu Z. Comparison of versions 6 and 7 3-hourly TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products. *Atmospheric Research*, 163, 91–101 (2015).

Lohmann D., Nolte-Holube R. and Raschke E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus* 48(A), 708-721 (1996).

Lohmann D., Raschke E., Nijssen B. and Lettenmaier D.P. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrol. Sci. J.* 43(1), 131-141 (1998).

Nash J.E. and Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3), 282-290 (1970).

Saurral R.I. The hydrologic cycle of the La Plata Basin in the WCRP/CMIP3 multi-model dataset. *Journal of Hydrometeorology*, 11, 1083–1102 (2010).

Saurral R. I.,Montroull, N. B., Camilloni, I.A. Development of statistically unbiased twenty-first century hydrology scenarios over La Plata Basin, *International Journal of River Basin Management*,11:4, 329-343, DOI: 10.1080/15715124.2014.885440 (2013).

Schick S., Rössler O and Weingartner R. An Evaluation of Model Output Statistics for Subseasonal Streamflow Forecasting in European Catchments. *J. Hydrometeor.* (2019) **20** (7): 1399–1416 (2019).

Su F., Hong Y. and Lettenmaier D. P. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata basin. *J. Hydrometeor.*, 9, 622–640 (2007).

Tesemma Z.K., Wei Y., Peel M.C. and Western A.W. The effect of year-to-year variability of leaf area index on Variable Infiltration Capacity model performance and simulation of runoff. *Advances in Water Resources* 83, 310–322 (2015).

Yong B., Ren L., Hong Y., Wang J., Gourley J., Jian S., Chen X. and Wang W. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe Basin, China. *Water Resour. Res.* 46 (7), W07542 (2010).

Yuan, X., and Wood E. F. Downscaling precipitation or bias-correcting streamflow? Some implications for coupled general circulation model (CGCM)-based ensemble seasonal hydrologic forecast. Water Resour. Res., 48 (12), doi:10.1029/2012WR012256 (2012).

Xue X., Zhang K., Hong Y., Gourley J., Kellogg W., McPherson R., Wan Z. and Austin B. New Multisite Cascading Calibration Approach for Hydrological Models: Case Study in the Red River Basin Using the VIC Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20. 05015019. 10.1061/(ASCE)HE. 1943-5584.0001282 (2015).

Zotelo C. H., Martín S.L. y Camilloni I. A. Estimación del tiempo de retardo de la onda de crecida en la cuenca superior del río Uruguay. *Meteorológica*, 32 y 33, 19-29, ISSN 0325-187X (2008).

VALORACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTEMICO DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS CON INVEST (SDR), EN UNA CUENCA SERRANA TRANSFORMADA. CASO DEL RIO SAUCE CHICO BUENOS AIRES, ARGENTINA.

Díaz Gómez A. R.[a] y Gaspari F. J.[a]

[a] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

La evaluación de la pérdida de servicios ecosistémicos de retención de sedimentos es clave en el manejo integral de cuencas. En el contexto de cambio global, los modelos espacialmente explícitos en cuencas transformadas y no aforadas aportan a la identificación de áreas prioritarias de restauración y manejo. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el servicio ecosistémico de retención de sedimento en la cuenca transformada del río Sauce Chico, Tornquist, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se partió de la identificación de subcuencas y de áreas de aporte de sedimentos directo a los cauces y áreas de retención, basado en la conectividad hidrológica del territorio. El estudio tomó como testigo la cuenca alta (365,61km^2) para el año 2017 para la implementación del modelo Invest© y el módulo Índice de flujo de sedimentos (Sediment delivery ratio SDR). A través del uso de técnicas de teledetección y SIG se validó el modelo con datos de campo e imágenes de alta resolución espacial. Los resultados sugieren que el máximo aporte de sedimentos ocurre en pendientes superiores a 26 % en la cabecera de cuenca aportando valores de 0,74 Mg año^{-1}pixel^{-1} . Las áreas de deposición de sedimentos se distribuyen sobre las planicies de inundación de los principales cauces, debido a la alta conectividad hidrológica. A partir de estos resultados, se jerarquizaron las subcuencas en base al flujo de sedimento y la máxima retención neta. Se concluye que el modelo SDR captura con alta precisión la heterogeneidad espacial del flujo de sedimentos y constituye una herramienta robusta para la evaluación del servicio ecosistémico de retención de sedimento, la cual, podría ser utilizada en el diseño de planes de restauración y estrategias de manejo.

Palabras Clave: Aporte de sedimentos, SIG, Conectividad hidrológica.

INTRODUCCIÓN

La interacción entre las funciones ecosistémicas hidrológicas, el uso del suelo y el manejo del recurso hídrico es clave para el desarrollo sostenible del territorio y en el manejo integral de cuencas hídricas. Estas, constituyen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo (Cotler and Priego, 2004) y relacionan las funciones que los usos de tierra y prácticas agropecuarias desempeñan, para mantener la calidad y cantidad del agua (dentro de los parámetros requeridos por los usuarios de un sitio en particular), sin alterar el paisaje (Denegri and Gaspari, 2010; Rodríguez Vagaría and Gaspari, 2015).

El servicio ecosistémico de retención de sedimentos es considerado un servicio de regulación (MA, 2005). El servicio ecosistémico de retención de sedimentos está directamente relacionado a la función ecosistémica de regulación de sedimentos. Esta función incluye dos procesos principales: erosión y retención de sedimentos, dinámica que involucra fuente y sumideros de sedimentos. Las fuentes de sedimentos son áreas con erosión hídrica, cárcavas, erosión en los bancos de los ríos, deslizamientos; mientras que los sumideros de sedimentos ocurren en áreas con menor pendiente, las llanuras de inundación, deposición directa hacia los cursos de aguas o reservorios. Los cambios de uso y cobertura pueden modificar la magnitud del flujo de sedimentos a escala de cuenca, la presencia de vegetación retiene sedimentos influenciando la dinámica fuente-sumidero (Boix-Fayos et al. 2008).

Los servicios ecosistémicos dependen de las características biofísicas de la cuenca hídrica (vegetación, topografía, suelo) y de los procesos dinámicos que intervienen, como el cambio de uso y cobertura del suelo (LULC) y clima (Brauman et al, 2007, Jackson et al., 2009; Nosetto et al., 2012; Jobbágy et al, 2013). Los cambios LULC pueden alterar el ciclo hidrológico afectando los patrones de evapotranspiración, infiltración y retención de agua en el suelo, el momento y el volumen de agua disponible y las características edáficas superficiales.

La degradación de tierras conduce a una disminución significativa de su capacidad productiva. Las actividades humanas que contribuyen a esta degradación, incluyen la utilización inapropiada de tierras agrícolas, prácticas deficientes en la ordenación de suelos y agua, deforestación, remoción de la vegetación natural, uso frecuente de maquinaria pesada, pastoreo excesivo, rotación incorrecta de cultivos y prácticas deficientes de riego (Rodríguez Vagaría, A. y F. Gaspari, 2015) y produce como consecuencia la erosión hídrica superficial, donde se pierden los estratos superiores de suelo, dejando al descubierto capas inferiores y disminuyendo la calidad edáfica, provocando menores rendimientos de los cultivos.

La evaluación de la pérdida de servicios ecosistémicos de retención de sedimentos es crítica para el manejo integral de cuencas hidrográficas, porque permite valorar el recurso suelo, identificar su impactos y potenciales áreas de restauración, promoviendo una producción agrícola sustentable a escala local. Conociendo los suelos, se advierte el uso sostenible de la provisión de bienes y servicios de los ecosistemas y se identifica que la retención del suelo por la vegetación natural conforma la conectividad con las masas de agua. Por ello, el valor de la vegetación en la retención del suelo es una función de su contexto fisiográfico y espacial y, por lo tanto, variable en una cuenca hidrográfica, siendo un indicador de SE.

En la actualidad el uso de modelos espacialmente explícitos es muy utilizado para entender la variabilidad espacial de las funciones ecosistémicas, sus SE y las potenciales consecuencias del impacto del cambio del uso del suelo, la degradación y el cambio climático. Otorgan una valiosa herramienta para conformar mapas, análisis espacio-temporal, y como base para la toma de decisión a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, admiten generar escenarios de servicio de provisión hídrica y de retención de sedimento en función del LULC, suelos y variabilidad climática (Bangash et al, 2013, Docku et al, 2015, Sharifi et al, 2017, Zarandian et al, 2017, Trisurat et al, 2018).

El modelo Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVest ®) es una herramienta de modelamiento espacial que permite cuantificar, mapear y valorar servicios ambientales y básicamente, proporciona información sobre cómo es probable que los cambios en los ecosistemas generen cambios en los flujos de beneficios para las personas (Tallis et al., 2013).

La estimación de la retención de suelo anual promedio a largo plazo se basa en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) (Renard et al., 1997) que se vincula con el modelo de Índice de Flujo de Sedimentos (Sediment Delivery Ratio, SDR) basado en el paisaje que representa la conectividad hidrológica (Borselli et al., 2008). El mismo modela la conexión entre la fuente de sedimentos (desde el paisaje) hacia los sumideros de sedimentos (por ejemplo, hacia los cursos de agua). Estos métodos se derivan de los utilizados en el modelo de retención de sedimentos InVEST (Valoración integrada de servicios ambientales y compensaciones) (Hamel et al., 2015; Sharp, 2018; Bouguerra et al, 2020, Woznicki et al, 2020) que confirma un modelo de simulación geoespacial.

En las últimas décadas la producción agrícola domina el uso del territorio en las áreas serranas, principalmente en la cuenca alta del Río Sauce Chico (de Antueno et al. 2020). Otro factor para considerar es la incertidumbre del impacto de la variabilidad climática en la dinámica y a la escasez de datos. En este contexto, los modelos espacialmente explícitos en cuencas transformadas, y no aforadas, aportan a la identificación de áreas prioritarias de restauración y manejo del suelo. Por ello, el objetivo de este trabajo fue cuantificar el servicio ecosistémico de retención de sedimento en la cuenca transformada del Río Sauce Chico, Partido de Tornquist, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, para evaluar la distribución espacial de los procesos de retención y exportación de sedimentos.

MÉTODOS

El estudio sobre servicios ecosistémicos hidrológicos y de retención, a escala local, es escaso en la región serrana del sudoeste bonaerense, Argentina, por ello, el tramo superior de la cuenca del Río Sauce Chico (365,61km^2) constituye una unidad de interés actual y potencial para el abastecimiento de agua a la región (Navarro y Cano, 2017) (ver Fig.1).

La cuenca alta del Río Sauce Chico fue tomada como experimental en el año 2017, para lo cual se implementó el modelo Invest© y el módulo Índice de Flujo de Sedimentos (Sediment Delivery Ratio SDR). Posteriormente, a través del uso de técnicas de teledetección y SIG se validó el modelo con datos de campo e imágenes alta resolución espacial.

El SDR conforma la exportación de sedimentos que se define como la cantidad de sedimento que una cuenca le aporta al cuerpo de agua en su salida (outlet). El cálculo de este valor incorpora la retención llevada a cabo por la vegetación y uso del suelo. Para su cuantificación se aplica la RUSLE, que es RUSLE es una herramienta que combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica, para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación basada en la USLE de Wischmeier y Smith (1978). La ecuación se denominó universal porque estaba exenta de algunas generalizaciones y restricciones geográficas y climáticas inherentes en los primeros modelos (Kirkby y Morgan, 1994). Es un modelo matemático de origen empírico (o parámetros agrupados) que utiliza información promedio sobre clima, suelos, topografía, cultivos y manejo del suelo (Renard et al., 1997).

Para estimar el rendimiento de sedimentos (Mg ha^{-1}año^{-1}) se aplicó el SDR (adimensional) a nivel geoespacial en la cuenca, y se multiplicó por la pérdida de suelo anual promedio de la RUSLE (A) para cada píxel. Se partió de la identificación de las unidades hidrológicas menores denominadas subcuencas y de las áreas de aporte de sedimentos directo a los cauces y áreas de retención, basado en la conectividad hidrológica del territorio.

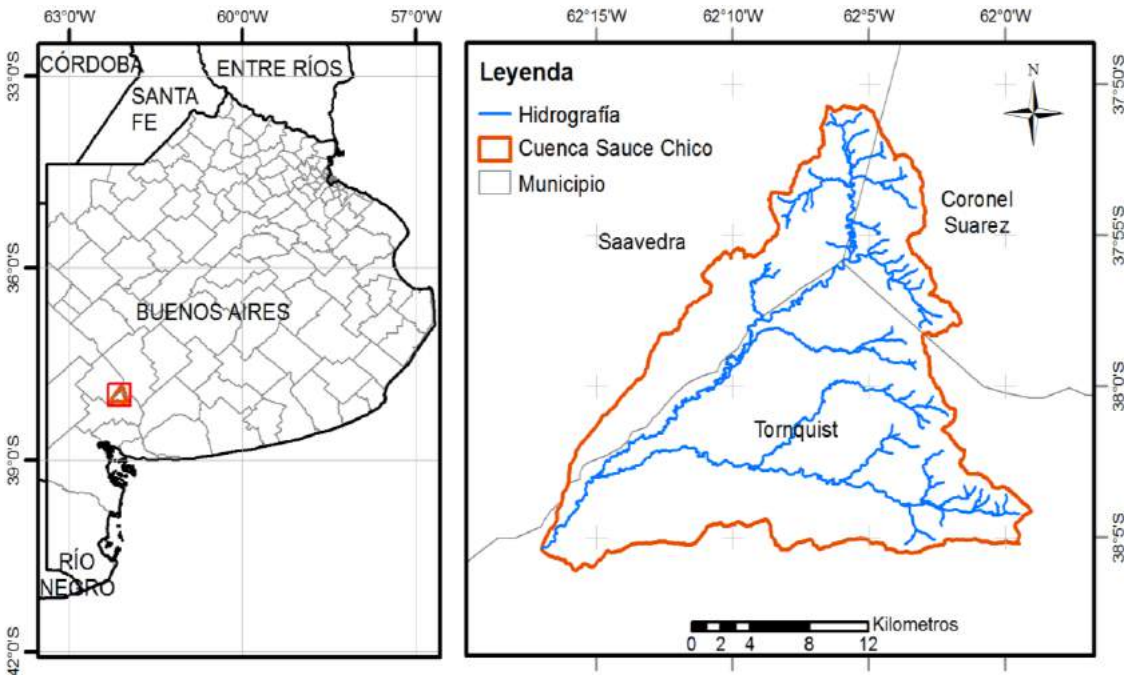


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta del Rio Sauce Chico.

El modelo cartográfico aplicado para SDR se plantea en la Figura 2, donde se presenta la cartografía utilizada para la modelización geoespacial, como ser: mapa de cobertura y uso del suelo, zonificación de la erodabilidad del suelo y erosividad pluvial, como así también la pendiente definida a partir del modelo de elevación digital (DEM) obtenido de un mapa corregido generado por la Misión Topográfica de Radar del Transbordador Espacial, conocida en inglés como SRTM.

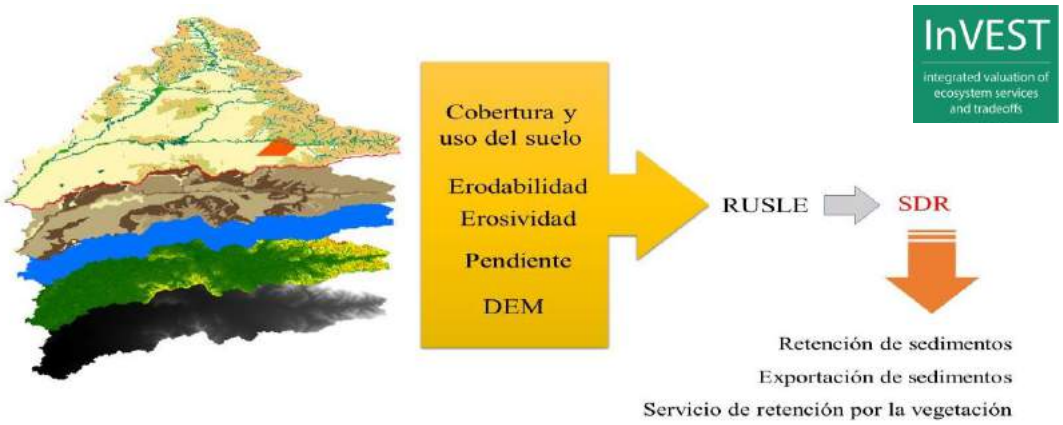


Figura 2. Modelo cartográfico aplicado para la obtención del SDR en la cuenca alta del Rio Sauce Chico.

El uso de RUSLE y SDR en grandes extensiones espaciales presenta desafíos con respecto a la incertidumbre en la estimación de la erosión de sedimentos y la entrega a los cuerpos de agua. RUSLE se desarrolló para su uso solo en tierras de cultivo y pastos a escala de parcela (Renard et al., 1997) y luego se ha aplicado a escalas amplias y en diferentes tipos de cobertura de suelo, uso, manejo, condiciones climáticas y topográficas con resultados satisfactorios (Woznicki, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La zonificación de cobertura y uso del suelo en la cuenca alta del Río Sauce Chico expresó una mayor proporción de área ocupada por uso agropecuario (51,3%) y el extremo altitudinal en la cabecera cubierto por pastizal con presencia de roca en superficie (29,2%). La presencia de una zona con pastizal natural (13,8%), un área que acompaña la ribera de los arroyos (2,8%) con montes de reparo y recreativos (1,8%) y al área urbana ocupa el 1,1% del total de la cuenca en estudio, como se muestra en la Figura 3.

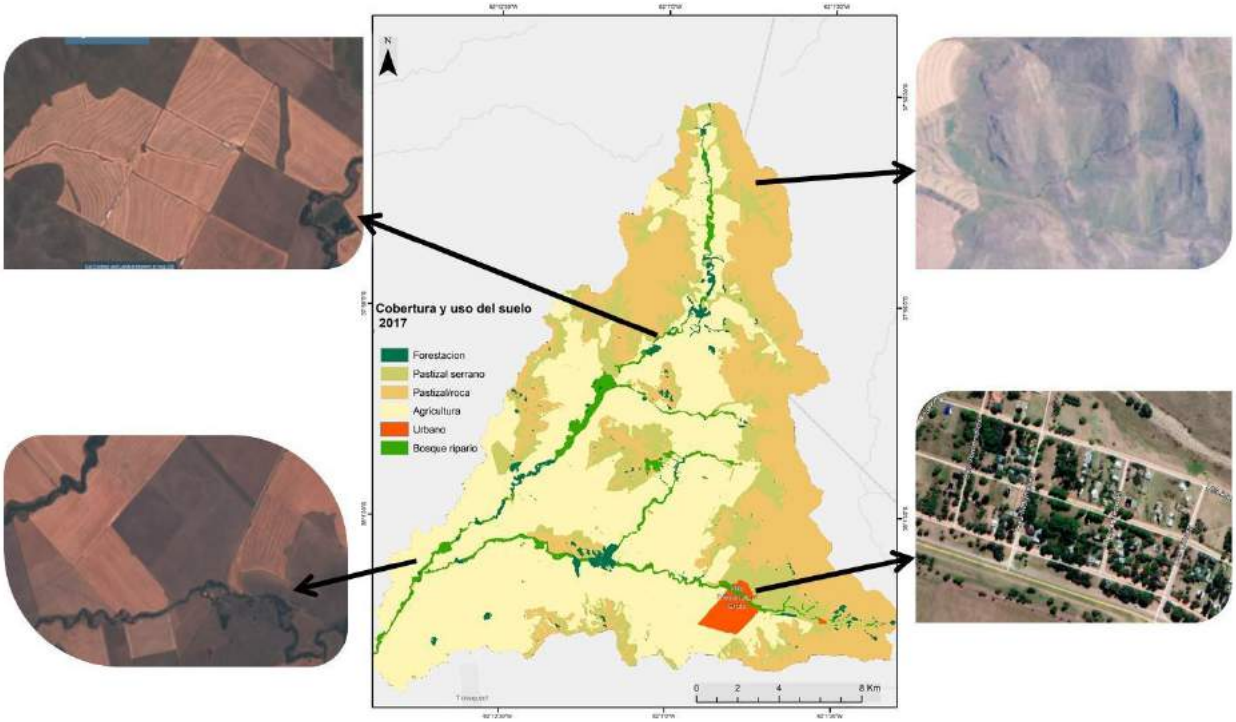


Figura 3. Identificación de áreas con flujo de sedimentos.

Los resultados sugieren que el máximo aporte de sedimentos ocurre en pendientes superiores a 26 % en la cabecera de cuenca aportando valores de 0,74 Mg año^{-1}píxel^{-1}. Las áreas de deposición de sedimentos se distribuyen sobre las planicies de inundación de los principales cauces, debido a la alta conectividad hidrológica.

Las tasas de pérdida de suelo que se expresan con el depósito y/o la exportación, variaron espacialmente en función de las condiciones fisiográficas por su topografía, climáticas representadas por la erosividad pluvial (regional y local), y el uso del suelo, enunciando diferencias en las tasas de erosión, las cuales se reflejan en mayor proporción en las tierras de cultivo y los pastizales (ver Fig. 4 y 5), así como en los altos valores que aparecen en las zonas ribereñas que expresan deposición de sedimentos (ver Fig. 4).

Los cultivos y los cañadones de los ríos y arroyos son los que más contribuyen a la pérdida de suelo, con valores > 0,75 Mg año^{-1}píxel^{-1} (= Tn año^{-1}pixel^{-1}) debido a sus grandes áreas de tierra y cuyo factor de cultivo (C) expresa valores altos, que representan suelos relativa y temporalmente expuestos, en época de descanso del cultivo. Sin embargo, la mayoría del suelo desprendido se vuelve a compactar o se deposita en el paisaje y no llega a los cuerpos de agua.

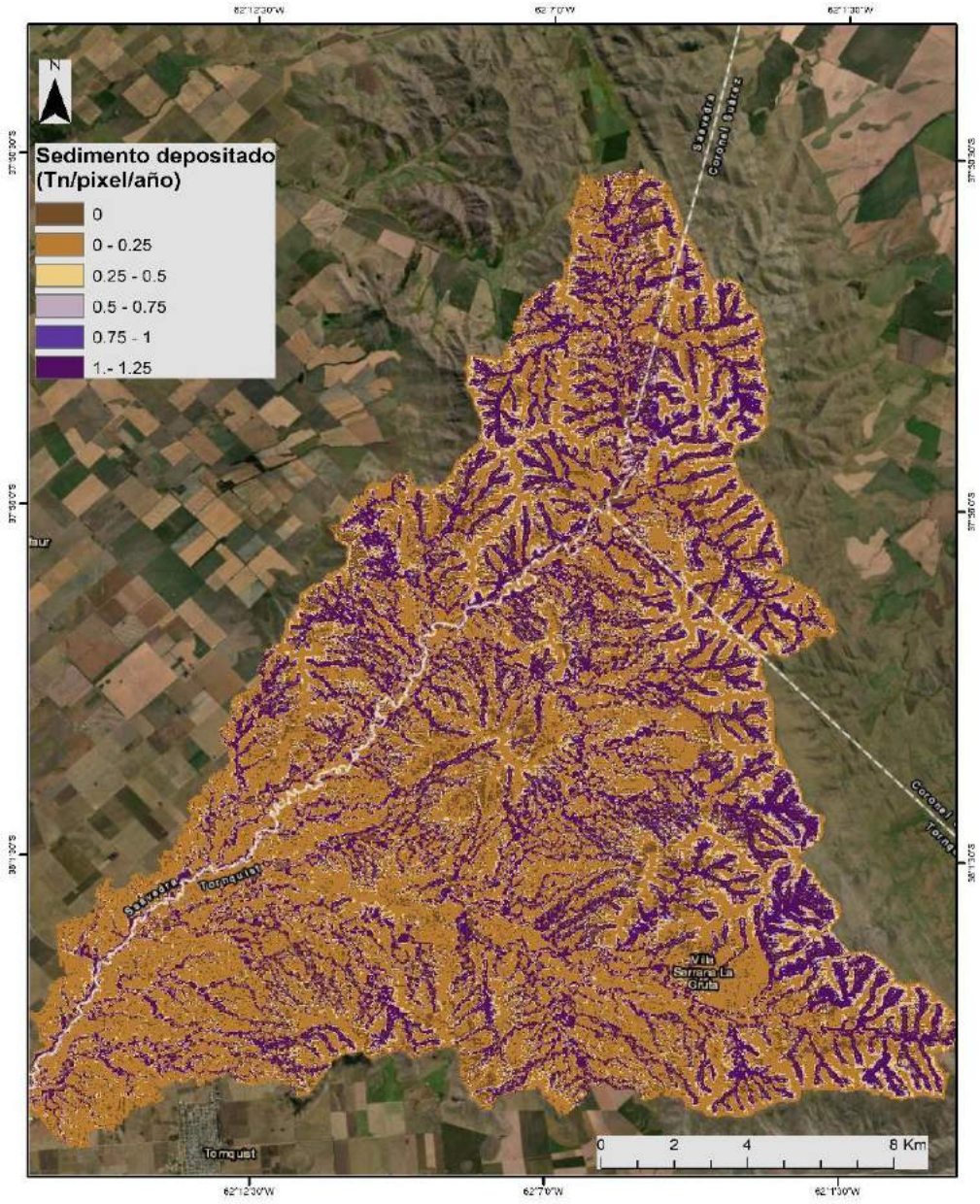


Figura 4. Identificación de áreas con flujo de sedimentos depositados.

En relación con la exportación de sedimentos, el área serrana de la cabecera de cuenca, con valores mayores a 1 Mg año^{-1}píxel^{-1} (= Tn año^{-1}píxel^{-1}), expresa que son áreas con el factor de cobertura alto y representan suelos relativamente expuestos, con altas pendientes.

Al incluir la conectividad, se estima que el área ribereña de todos los cursos de agua se comporta como conector natural debido a que expresa resultados entre 0,25 y 0,5 Mg año^{-1}píxel^{-1} (= Tn año^{-1}píxel^{-1}) en el análisis geoespacial, indicando condiciones conformes y equitativas.

La variación espacial en la pérdida y entrega de sedimentos sigue el patrón espacial de la vegetación natural y del paisaje. La mayor pérdida y la exportación de sedimentos ocurre donde predomina la vegetación natural (pastizales) que coincide espacialmente con las áreas de mayor pendiente y mayor erodabilidad de los suelos. Por lo tanto, la vegetación cumple con la función de retención de sedimentos (ver Fig. 5 y 6).

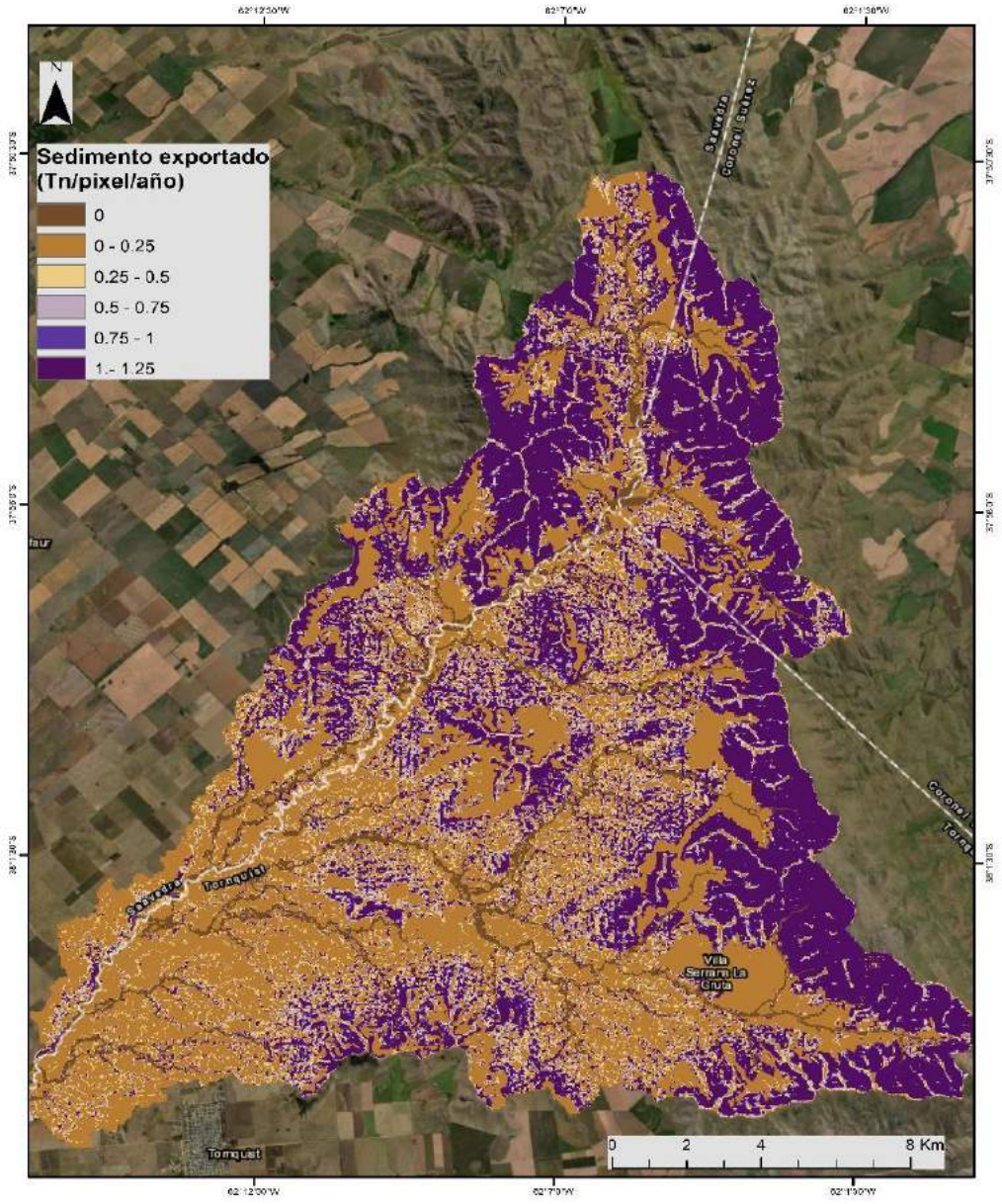


Figura 5. Identificación de áreas con flujo de sedimentos exportados.

En la Figura 6 se presenta el valor de SDR en la cuenca en estudio y representa la conectividad por medio del Índice de flujo de sedimentos, el cual estima que sólo un tercio de la pérdida de suelo de los cultivos cultivados y arbustos/matorrales llega a los cuerpos de agua.

Las clases de cobertura del suelo desnudo o con poca cobertura proporcionan el mayor valor por la pérdida de suelo y el rendimiento mínimo de sedimentos, mientras que la cobertura del suelo de zonas ribereñas, que expresan humedales, proporciona el valor máximo (Fig. 6).

La zona con forestación / monte impide que la mayor cantidad de sedimentos ingresen a los cuerpos de agua, en comparación con los humedales herbáceos emergentes que lo evitan, en coincidencia con Woznicki (2020).

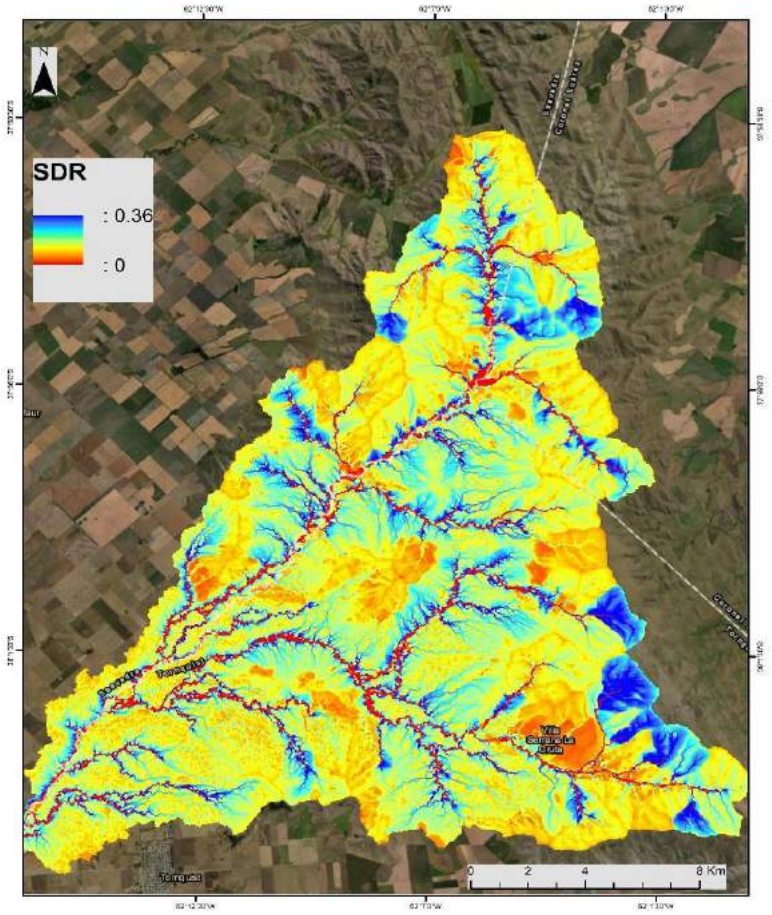


Figura 6. Identificación de áreas con Índice de Flujo de Sedimentos (SDR).

El SDR de la Figura 6 expresa el grado de conectividad del paisaje con los cursos de agua en la cuenca alta del Río Sauce Chico, mejorando el entendimiento de la influencia de la cobertura terrestre natural en la retención de sedimentos, la cual es espacialmente variable y una función del contexto fisiográfico (topografía, suelo, clima), la disposición espacial de la cobertura terrestre y la proximidad a los cursos de agua de agua, como menciona Woznicki (2020). Hay tendencias regionales y condiciones fisiográficas que dictan dónde la cobertura natural del suelo tiene el mayor valor en la retención de sedimentos.

El valor de la cobertura natural en la retención de sedimentos en la cuenca no considera la idoneidad espacial, la vulnerabilidad o la probabilidad de una transición fuera de la cobertura terrestre natural. Más bien, es una estimación amplia de lo que sería la erosión laminar y potenciales surcos a cárcavas, si se perdiera la cobertura natural del suelo. Por ejemplo, tierras marginales de baja productividad con limitaciones para el cultivo agrícola (Kang et al., 2013), donde las tierras marginales a menudo se encuentran en pendientes pronunciadas y suelos erosivos, expresa como resultado una probabilidad espacial variable de que la cobertura natural de la tierra se pierda debido a la agricultura.

En relación a las zonas agrícolas, estas se constituyen como fuentes de sedimentos con valores de exportación entre 0,5 – 1,5 Mg.píxel^{-1} .

En la Fig. 7 se identifica un área donde el flujo de exportación es nulo, pero que en el momento de eventos de lluvias torrenciales se comporta como un conector hídrico temporal.

A partir de estos resultados, se jerarquizaron las subcuencas en base al flujo de sedimento (ver Fig. 8). Los valores absolutos que se visualizan deben tomarse como relativos debido a la imposibilidad de la calibración directa del modelo por la falta de datos en la cuenca. Sin embargo, esta jerarquización captura coherentemente la dinámica del SE de retención en relación con las características topográficas y biofísicas de la cuenca.

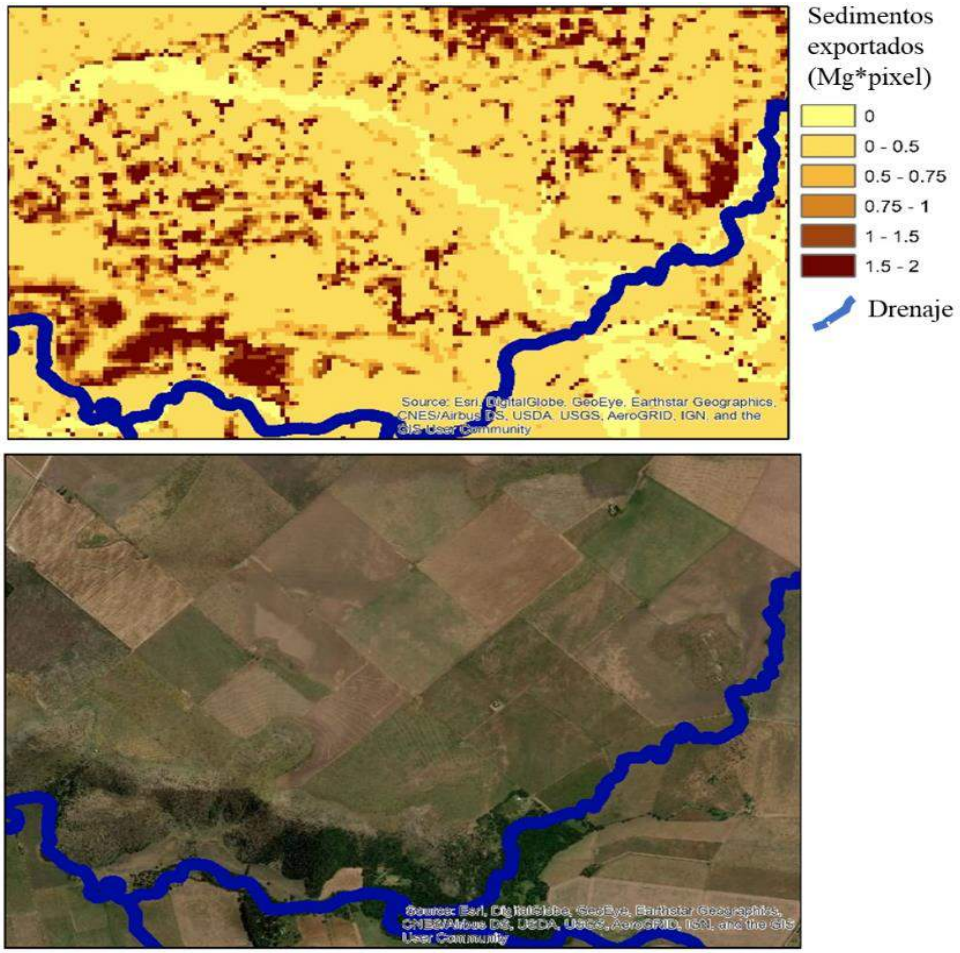


Figura 7. Identificación de áreas según flujo de sedimentos (SDR).

Los resultados del modelo SDR sugiere que las subcuencas con máximo servicio de retención de sedimentos son las subcuencas de la cabecera (Ventana 1 y SC1), coincidentemente a que presentan mayor pendiente y alto porcentaje de cobertura de pastizal, el cual cumple la función de retención de sedimento. Por otro lado, en las subcuencas SC5, Ventana 2 y SC4, el servicio ecosistémico de retención de sedimentos es menor, por lo tanto, son las prioritarias en la aplicación de pautas de manejo y restauración.

Hamel et al. (2015) expresan que los parámetros de entrada RUSLE y SDR son inherentemente inciertos y, en algunos aspectos, son función de la resolución espacial de los datos, con lo cual se coincide en este trabajo. Como así también con Vigiak y col. (2012) que señalan que la sensibilidad de los parámetros en el SDR al DEM puede afectar las predicciones del modelo y contribuye a la incertidumbre (Hamel et al., 2017; Woznicki, 2020).

Además, como sugiere Woznicki (2020) las estimaciones de pérdida de suelo representan la erosión laminar y de riachuelos, mientras que la entrega de sedimentos del SDR modela el porcentaje de ese suelo erosionado que llega a un cuerpo de agua.

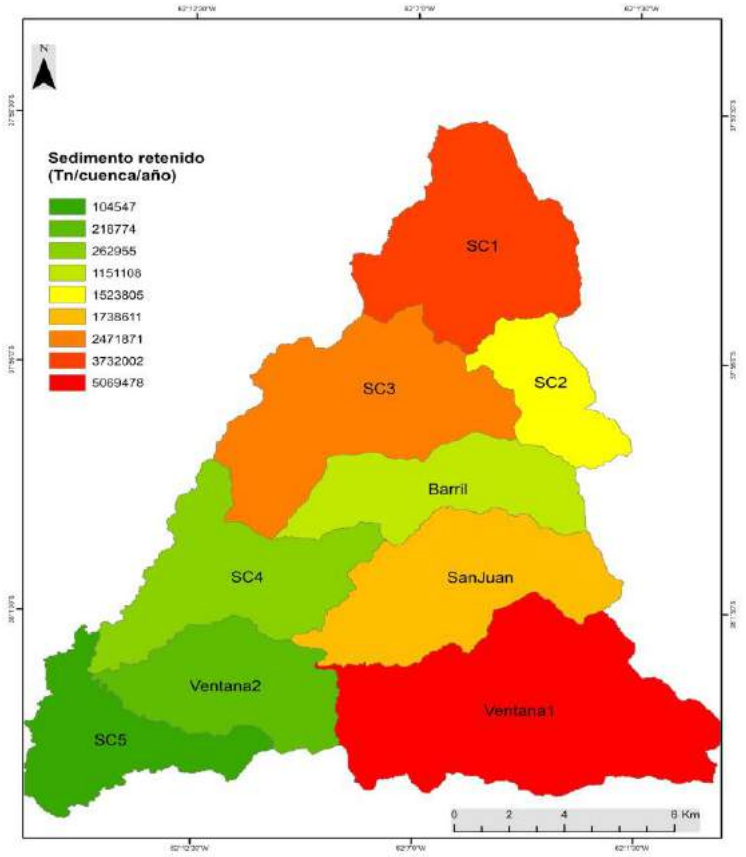


Figura 8. Identificación de sedimentos retenidos por subcuencas (Mg año^{-1}píxel^{-1} = Tn año^{-1}píxel^{-1}).

La aplicación integrada del modelo InVEST SDR permitió identificar y priorizar las áreas degradadas por erosión hídrica superficial en la cuenca alta del Río Sauce Chico. La cobertura natural del suelo y/o su pérdida tiene valor como servicio ecosistémico y ejerce cierto nivel de influencia sobre los flujos erosivos, el transporte y el depósito, por ello, conectar el valor paisajístico de la cobertura del suelo con el balance de sedimentos es fundamental para conocer el flujo total y su dinámica.

CONCLUSIONES

Se concluye que el modelo SDR captura con alta precisión la heterogeneidad espacial del flujo de sedimentos, aportando al conocimiento del servicio ecosistémico de retención en la cuenca. El análisis espacial de áreas de retención y exportación de sedimentos, incluyendo la conectividad hidrológica, otorga bases para la generación de pautas de manejo y conservación en la cuenca.

La modelización realizada sugiere que la cuenca alta del Río Sauce Chico no presenta alta conectividad hidrológica, por lo tanto, los sedimentos quedan dentro de la misma sin llegar en valores máximos a los cursos de agua afectando in situ. Esto evidencia una necesidad máxima de manejo del recurso suelo-vegetación-agua y el balance de sedimentos.

El modelo Invest SDR constituyó una herramienta robusta para la evaluación del servicio ecosistémico de retención de sedimento, la cual, podría ser utilizada en el diseño de planes de restauración y estrategias de manejo. La jerarquización a nivel de cuenca del servicio ecosistémico de retención de sedimentos con este modelo permitió la identificación de subcuencas prioritarias para el desarrollo de planes de manejo y restauración.

La obtención de datos para la toma de decisión es imprescindible para el manejo de cuencas. Por ello, se necesita incrementar el conocimiento en los tipos de captura de datos a campo, incorporación de estaciones hidrometeorológicas, mediciones de la pérdida del suelo sistemáticas en las cuencas serranas o, por ejemplo, con la implementación de técnicas de teledetección y sensores, para la medición de los sedimentos en los cursos de agua. Es necesario, en futuras investigaciones en relación con la sensibilidad y calibración del modelo.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado "Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense", del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J. and Schuhmacher, M. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. Science of the Total Environment, 458, 246-255. (2013).

Bouguerra, S., Jebari, S., and Tarhouni, J. Spatiotemporal analysis of landscape patterns and its effect on soil loss in the Rmel river basin, Tunisia. Soil and Water Research. (2020).

Boix-Fayos, C., de Vente, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G. G., and Castillo, V. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. Hydrological Processes: An International Journal, 22(25), 4922-4935. (2008).

Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K. and Mooney H.A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Rev. Environ. Resour*. 32, 67–98. (2007).

Cotler, H. and Priego A.. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: caso de la cuenca Lerma-Chapala. SEMARNAT-INE. Pp 79-89. (2004).

Denegri, G. A. and. Gaspari. F. J. Lineamientos para la formulación de pagos por servicios ambientales. Estudio de caso: Alta cuenca del Río Sauce Grande. Argentina. *Revista Cuadernos Geográficos.* Universidad de Granada. 46: 93-110. (2010).

De Antueno, L., Gaspari, F. J., and Guaraca, A. G. (2020). Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal, 8(1), 20-42.

Duku, C., Rathjens, H., Zwart, S. J., and Hein, L. Towards ecosystem accounting: a comprehensive approach to modelling multiple hydrological ecosystem services. *Hydrology & Earth System Sc. Discussions*, 12(3). (2015).

Hamel, P., and Guswa A. J.. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina, (i), 839–853. http://doi.org/10.5194/hess-19-839-2015. (2015).

Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., and Mueller, C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): case study of the cape fear catchment, North Carolina, USA. *Sci.TotalEnviron*.524,166–177. https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2015.04.027. (2015).

Hamel, P., Falinski, K., Sharp, R., Auerbach, D.A., Sánchez-Canales, M., and Dennedy-Frank, P.J., Sediment delivery modeling in practice: comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions. *Sci. Total Environ.* 580, 1381–1388. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.103. (2017).

Jackson, RB; Jobbágy EG and Nosetto M.D. Ecohydrology in a human- dominated landscape. *Ecohydrology*, 2:383-389. (2009).

Jobbágy, E., Acosta, A.M. and Nosetto M.D. Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). Asoc.Argentina de Ecología. *Ecología Austral* 23:000-000. (2013).

Kang, S., Post, W., Wang, D., Nichols, J., Bandaru, V. and West, T... Hierarchical marginal land assessment for land use planning. *Land Use Policy* 30, 106–113. https://doi.org/ 10.1016/j.landusepol.2012.03.002. (2013).

Kirkby, M. J. and Morgan R. P. C. Erosión de suelos. Limusa - Noriega Editores. México. 375 pp (1994).

Navarro, E. L. and Cano, D. Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes: uso de técnicas digitales. In IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT (2017).

Nosetto, M.D.; E.G. Jobbágy; A.B. Brizuela and Jackson R.B. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154:2-11. (2012).

Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K. & Kasperson, R. (2005). Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture Washington, DC. (1997).

Rodríguez Vagaría, A. and Gaspari F. Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*. Vol. 56(1), 105-119. ISSN: 1012-1617. Con referato. http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/40100/1/articulo6.pdf (2015).

Sharifi, A., Yen, H., Boomer, K. M., Kalin, L., Li, X., and Weller, D. E Using multiple watershed models to assess the water quality impacts of alternate land development scenarios for a small community. *Catena*, 150, 87-99. (2017).

Sharp, R.. InVEST 3.6.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund. (2018).

Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Sharp, R. and Nelson E. InVest 2.5.3 user's guide. The Natural Capital Project, Stanford http://www.naturalcapitalproject.org (2013).

Trisurat, Y., Aekakkararungroj, A., Ma, H. O., and Johnston, J. M. Basin-wide impacts of climate change on ecosystem services in the Lower Mekong Basin. *Ecological research*, 33(1), 73-86. (2018).

Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., and Roberts, A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology* 138, 74–88. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026. Information. Photogramm Eng Rem S 81, 345354. (2012).

Wischmeier, W.H. and Smith D. D.. Predicting Rainfall Erosion Losses. *Agriculture Handbook* 537. US Department of Agriculture. Science and Education Administration. Washington. USA. 58 p. (1978).

Woznicki S.A., Cada P, Wickham J., Schmidt M.; Baynes J.; Mehaffey M. and A. Neale. Sediment retention by natural landscapes in the conterminous United States. *Science of the Total Environment* 745 (2020) 140972. 11p. (2020)

Zarandian, A., Baral, H., Stork, N. E., Ling, M. A., Yavari, A. R., Jafari, H. R., and Amirnejad, H. Modeling of ecosystem services informs spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. *Land Use Policy*, 61, 487-500. (2017).

MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA PARA ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO DE CALIDAD DE AIRE

Diaz J. A.[a] y Berri G. J.[a,b]

[a] *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA*

e-mail: diazjuanaugusto@gmail.com

RESUMEN

Se presenta un sistema de modelado numérico de dispersión atmosférica que se puede utilizar tanto en estudios de diagnóstico como para el pronóstico a corto plazo de la calidad del aire a escala local y regional. El sistema emplea dos modelos numéricos de cálculo. Un modelo de capa límite atmosférica en escala regional realiza el pronóstico de los campos tridimensionales de viento, temperatura, etc., en alta resolución espacial y temporal. El modelo de dispersión atmosférica utiliza ese pronóstico para calcular la distribución espacial de las concentraciones de las sustancias modeladas. El modelo de dispersión atmosférica calcula la trayectoria lagrangiana de las sustancias emitidas y luego un módulo de cálculo gaussiano determina la dispersión local y las concentraciones resultantes. El sistema realiza los cálculos con resolución espacial de hasta 100 metros y resolución temporal de hasta 30 segundos, pudiendo elegir a voluntad la duración del período de simulación, desde pocas horas hasta varios años. Se describe el sistema de modelado y se presentan diferentes ejemplos de simulaciones realizadas para la región del Gran La Plata, provincia de Buenos Aires, por periodos de tiempo variables de hasta 1 año. El sistema de modelado es de utilidad tanto para diagnósticos de situación delimitando las zonas potencialmente afectadas por emisiones industriales controladas, como así también en el caso de emisiones accidentales o incendios forestales.

Palabras Clave: Modelado numérico, Dispersión atmosférica, Pronostico, Gran La Plata

INTRODUCCIÓN

La mala calidad de aire es una problemática que afecta al 92% de la población mundial y tiene un mayor impacto en las áreas urbanas. En el año 2014, la Organización Mundial de la Salud informó que 7 millones de personas fallecieron como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica (WMO 2013 y WMO 2016). La región de estudio de este trabajo, el Gran La Plata, no se encuentra exenta de este problema. Otros autores han observado la concentración de material particulado (MP10 y MP2,5) por encima de los umbrales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Colman et al., 2014; Orte et al., 2015). Otros estudios han encontrado una variación en la acidez del agua de lluvia (Arrieta et al., 2015).
La región del Gran La Plata se conforma por 3 partidos, La Plata, Ensenada y Berisso, ubicada al noreste de la provincia de Buenos Aires y alberga una población que supera los 800 mil habitantes (INDEC, 2010) con una mayor concentración en la ciudad de La Plata. Entre estos 3 partidos se encuentra un polo petroquímico complejo que tiene a la principal refinería de petróleo del país, siendo la de mayor volumen de producción a nivel nacional (Represa et al., 2016), además de otras 6 refinerías e industrias afines. En cercanías, se halla la central termoeléctrica "Central Térmica Ensenada de Barragán" y en la costa del Rio de La Plata, se encuentran un astillero y una siderúrgica.

La presencia de estas fuentes puntuales de emisiones gaseosas de gran magnitud exige una atención especial en la calidad del aire. Debido a que no se cuenta con una red de monitoreo continuo en la región, algunos autores han empleado técnicas alternativas para estudiar la calidad del aire. En este trabajo se propone al modelado numérico como una alternativa para el estudio de calidad de aire. La extensa bibliografía sobre el tema demuestra que es una herramienta de gran potencial, con la capacidad de abarcar áreas extensas y alcanzar alta resolución en los cálculos. Sin embargo, un insumo importante para la obtención de buenos resultados, son los datos meteorológicos. El comportamiento de la atmósfera y sus condiciones definen hacia dónde se desplazarán los contaminantes una vez emitidos y en qué lugar se producirán las mayores concentraciones.

Para lograr una buena descripción de las condiciones meteorológicas en la baja atmósfera en la región se emplea el modelo de capa límite (MCL) desarrollado especialmente para la región del Río de La Plata. El modelo MCL se basa en una capa límite hidrostática y seca e incluye las ecuaciones básicas de conservación de cantidad de movimiento, masa y energía, con una clausura turbulenta de primer orden. Los detalles acerca de la formulación y el funcionamiento del modelo se pueden ver en Berri et al. (2010). El modelo puede inicializarse con observaciones locales (Berri and Bertossa, 2017), como así también con las salidas de modelos de pronóstico operativo a escala regional (Sraibman and Berri, 2009; Berri and Dezzutti, 2020). El modelo MCL genera los campos tridimensionales de viento, temperatura y presión atmosférica que luego emplea el modelo de dispersión atmosférica (MDA).

El objetivo de este trabajo es presentar el modelo de dispersión atmosférica que se encuentra en desarrollo y su acople con el modelo de capa limite. Se desarrollan las ecuaciones utilizadas por el modelo, además de los diferentes productos de salida obtenidos. Por último, se presentan algunos de los resultados obtenidos de una simulación del periodo 2012-2016, para la región del Gran La Plata.

EL MODELO MDA

El modelo de dispersión atmosférica tiene una resolución horizontal de 100 metros, un único nivel de cálculo de concentraciones atmosféricas definido por el usuario y una resolución temporal que puede variar entre 10 y 900 segundos. El periodo a modelar es variable y depende principalmente del insumo de datos meteorológicos. MDA está basado en el modelo HIRHYLTAD, desarrollado por Blanco and Berri (2013) y utilizado en un estudio de dispersión de plumas de humo por incendios forestales. MDA cuenta con la posibilidad de modelar varias fuentes puntuales y continuas en simultaneo, admitiendo en su versión actual un máximo de 5 fuentes. Es importante que las fuentes ingresadas emitan el mismo contaminante atmosférico, ya que por el momento no se cuenta con un modelo de reacciones químicas. La región de aplicación del modelo está centrada en La Plata con 27 km de ancho y 19,6 km de largo abarcando todo el Gran La Plata. La secuencia de cálculo consta de dos partes. En primer lugar, se calcula el movimiento de los centros de masa de las sucesivas bocanadas emitidas utilizando una metodología lagrangiana. Luego para cada paso de tiempo se calcula la dispersión local alrededor de todos los centros de masa de todas las bocanadas que se encuentran dentro de la región y se obtiene un valor de concentración para cada punto del retículo de resolución. Para el cálculo de dispersión se emplean las ecuaciones del modelo gaussiano, que se detallan más adelante.

Los datos necesarios para la ejecución se dividen en dos grupos. Un primer grupo incluye los campos meteorológicos que son generados por el modelo de capa limite. Estos campos tienen una resolución horizontal de 1 km, resolución temporal de 15 minutos y son

generados para el mismo dominio que el MDA. Se trabaja con una alta resolución vertical en la baja atmósfera con 9 niveles, el primero de ellos a 1 cm y el último a 480 m de altura. El segundo grupo de datos requeridos son los parámetros que caracterizan las fuentes puntuales de emisión, es decir la altura y diámetro de la chimenea, velocidad y temperatura de salida de los gases, ubicación de la fuente y tasa de emisión. Por último, se debe ingresar el periodo de tiempo a modelar, la resolución temporal de los cálculos, la altura a la cual se quiere calcular la concentración de la sustancia emitida y cuál ecuación se utilizará para el cálculo de la altura efectiva de emisión.

Cuando los contaminantes atmosféricos son emitidos se desplazan en la vertical una determinada altura hasta que su eje de desplazamiento se dispone en forma horizontal. Esta altura final, que depende de la temperatura y velocidad de salida de los gases, además de las condiciones atmosféricas, se denomina *altura efectiva de emisión*. Para obtener dicha altura se han propuesto diferentes métodos y ecuaciones. Debido a que la confiabilidad en el resultado del cálculo depende del contaminante, el modelo incluye dos métodos diferentes y se deja a elección del usuario cual utilizar. La ecuación de Holland "ver Ec. (1)", es uno de los métodos más utilizados debido a su sencillez en la formulación (Holland, 1953). Debe prestarse atención a que la fórmula de Holland calcula la diferencia de altura entre la chimenea y la altura efectiva, por lo que es necesario emplear la "Ec. 2". El otro método posible es la formulación para elevación de la pluma elaborado por Briggs "ver Ec. (3)" (Chico y Catalano, 1986). Es una secuencia de cálculo más compleja, que analiza el mecanismo dominante en la elevación de la pluma. Para ello se definen dos condiciones de atmosfera, estable o neutra-inestable a través de la velocidad del viento y la diferencia entre la temperatura de salida de los gases y la ambiente. Dependiendo de la condición atmosférica el ascenso puede ser por flotabilidad, cuando los gases tienen una temperatura mucho mayor que la ambiente, o debido a la cantidad de movimiento, asociado a la velocidad de salida de los gases. Por lo tanto, se recomienda esta metodología cuando se trabaja con temperaturas de salida de gases cercanas a las ambientales, ya que se han encontrado diferencias considerables con la ecuación de Holland.

$$\Delta h = \frac{d \cdot V_s}{u}\left[1{,}5 + 2{,}68 \times 10^{-3}\, P_d \left(\frac{T_s - T_a}{T_s}\right)\right] \quad Ec.(1)$$

$$V_s = Velocidad\ de\ salidad\ de\ los\ gases\ [m/s]$$
$$d = Diametro\ de\ la\ chimenea\ [m]$$
$$u = velocidad\ del\ viento\ a\ la\ altura\ de\ la\ chimenea\ [m/s]$$
$$T_a = Temperatura\ del\ aire\ a\ la\ altura\ de\ la\ chimenea\ [K]$$
$$T_s = Temperatura\ de\ salida\ de\ los\ gases\ [K]$$
$$P_d = Presión\ atmosferica\ a\ la\ altura\ de\ la\ chimenea\ [hpa]$$

$$h_e = h + \Delta h \quad Ec.(2)$$
$$\mathrm{h}_e = Altura\ efectiva\ de\ emisión\ [m]$$
$$h = Altura\ de\ la\ chimenea\ [m]$$
$$\Delta h = Ascenso\ o\ descenso\ según\ Ec.\ (1)\ [m]$$

Método de Briggs	
Fluctuación por Flotabilidad $F_b = gV_s d_s^2\left(\frac{\Delta T}{4T_s}\right)$	Fluctuación por Momento $F_m = gV_s^2 d_s^2\left(\frac{T_a}{4T_s}\right)$

$$h' = \begin{cases} h, & V_s \geq 1.5u \\ h + 2d\left[\frac{V_s}{u} - 1.5\right], & V_s < 1.5u \end{cases}$$

$Si\ T_s \geq T_a\ \ Casos\ Inestables$	$Si\ T_s < T_a\ \ Casos\ Estables$
$\Delta T_c = \begin{cases} 0.00297 \cdot T_s \cdot \frac{\sqrt[3]{V_s}}{\sqrt[3]{d^2}}, & F_b < 55 \\ 0.00575 \cdot T_s \cdot \frac{\sqrt[3]{{V_s}^2}}{\sqrt[3]{d}}, & F_b \geq 55 \end{cases}$	Parámetro de estabilidad $S = g\left(\frac{\partial\theta}{\partial Z}\right)T_a^{-1}$ $\Delta T_c = 0.0019582 T_s V_s \sqrt{S}$
$h_e = \begin{cases} h' + 21.45\frac{\sqrt[4]{{F_b}^3}}{u}, & F_b < 55, \Delta T \geq \Delta T_c \\ h' + 38.71\frac{\sqrt[5]{{F_b}^3}}{u}, & F_b \geq 55, \Delta T \geq \Delta T_c \\ h' + 3d \cdot \frac{V_s}{u}, & \Delta T < \Delta T_c \end{cases}$	$h_e = \begin{cases} h' + 2.6 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_m}{u \cdot S}\right)}, & \Delta T \geq \Delta T_c \\ h' + 1.5 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_m}{u\sqrt[3]{S}}\right)}, & \Delta T < \Delta T_c \end{cases}$

$Ec.(3)$

Una vez obtenida la altura efectiva de emisión, se simula la emisión de una bocanada de sustancia. El modelo, a partir de las condiciones atmosféricas, calcula el desplazamiento de los centros de masa de las bocanadas y, empleando la ecuación gaussiana de dispersión atmosférica, calcula parámetros auxiliares de dispersión "ver Ec. (4)".

$$Q_c = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_y \sigma_z}\ ;\ \sigma_y(x) = \frac{S_{y1}}{\sqrt{1 + S_{y2} \cdot x}}\ ;\ \sigma_z(x) = S_{z1} \cdot x \cdot (1 + S_{z2})^{S_{z3}} \quad Ec.(4)$$

$$Q_c = \textit{Concentración en el centro}\ [m/s^3]$$
$$Q = \textit{Tasa de emisión}\ [g/\mathrm{s}]$$
$$\sigma_y = \textit{Coeficiente de dispersión horizontal}\ [m]$$
$$\sigma_z = \textit{Coeficiente de dispersión vertical}\ [m]$$
$$x = \textit{Distancia recorrida por el centro de masa}\ [m]$$

Los coeficientes S_{y1}, S_{y2}, S_{z1}, S_{z2} y S_{z3} varían de acuerdo con la condición de estabilidad atmosférica, teniendo en cuenta las 6 clases definidas por Pasquill (Pasquill F. 1974, Briggs 1973). La forma propuesta por Pasquill para el cálculo de la estabilidad requiere datos de radiación solar directa, velocidad del viento a 10m de altura y fracción nubosa. Debido a que no se cuenta con esos datos y teniendo en cuenta que la nubosidad aún hoy en día es difícil de modelar incluso con los mejores modelos de pronóstico meteorológicos operativos, se decidió utilizar un método alternativo. Se siguió la idea propuesta por Golder (Golder, D. 1972 y Sharan et al. 2005) para definir una relación entre las clases de Pasquill y la longitud de Monin-Obukhov (L) que se obtiene a partir de la "Ec. (5)". Se definieron 3 curvas que relacionan los valores de 1/L y las clases de Pasquill teniendo en cuenta la rigurosidad del suelo, estableciendo diferencias entre zonas urbanas, rurales o rio.

$$Ri = \frac{g}{\theta}\frac{\partial\theta}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{-2} \; ; \; \frac{1}{L} = \begin{cases} \dfrac{Ri}{z \cdot (1 - \beta \cdot Ri)} \; si \; Ri \; \geq 0 \\ \dfrac{Ri}{z} \; si \; Ri \; < 0 \end{cases} \qquad Ec(5)$$

$$Ri = \textit{Número de Richardson}$$

$$L = \textit{Longitud de Monin Obukhov} \, [m^{-1}]$$

$$g = \textit{aceleración gravitatoria, aproximada a 9,80616} \, [m/s^2]$$

$$\theta = \textit{Temperatura potencial del aire} \, [K]$$

$$\beta = \textit{Coeficiente auxiliar constante, igual a 5}$$

$$z = \textit{Altura del centro de masa} \, [m]$$

Por último, una vez obtenidos los parámetros Q_c, σ_y, σ_z se generan los datos de salida del modelo con una resolución temporal de una hora. Para eso se identifica la ubicación del centro de masa de cada bocanada emitida y se definen los puntos de retículo afectados de acuerdo con el coeficiente de dispersión horizontal, asignando a los mismos un único valor de concentración a partir de la "Ec. (6)". Los campos generados son luego post procesados con el software R obteniendo las salidas graficas usando las librerías Ggplot2 (H. Wickham 2016), Ggmap (D. Kahle and H. Wickham 2013) y Dplyr (H. Wickham et al. 2020). A su vez, con frecuencia de una hora, se almacenan las variables meteorológicas auxiliares lo que permite analizar el entorno atmosférico, a fin de determinar de qué manera puede influir en la concentración resultante. Un ejemplo de ello es estudiando la influencia de la dirección del viento en eventos de máxima concentración o la presencia de una inversión térmica en la capa limite.

$$C = Q_c \cdot e^{\left(-\frac{D_h}{2 \cdot \sigma_y}\right)^2} \cdot e^{\left(-\frac{D_z}{2 \cdot \sigma_z}\right)^2} \qquad Ec.(6)$$

$$C = \textit{Concentración de sustancia modelada a la altura elegida} \, [\mu g/m^3]$$

$$D_h = \textit{Distancia horizontal a la fuente} \, [m]$$

$$D_z = \textit{Distancia vertical respecto a la altura de cálculo} \, [m]$$

EXPERIMENTO

A continuación, se describen las principales características del diseño de un experimento realizado con el modelo de dispersión atmosférica. Se decidió trabajar con un periodo de 5 años del 01/01/2012 al 31/12/2016. Como datos de entrada al modelo de capa limite se utilizó el radiosondeo de 12UTC y las observaciones trihorarias de temperatura de la estación Ezeiza Aero, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional. Se decidió trabajar con 3 fuentes de emisión con parámetros descriptos en la Tabla I. Los mismos fueron adaptados de otros trabajos y bibliografía sobre la temática, por lo que no representan condiciones específicas de la región (Orille Fernández 1996, Jacobson 2005, Humán Pio 2017, Myllyvirta 2020). Esto se debe a que los datos de emisiones gaseosas no son de acceso público, lo cual dificulta el estudio de calidad de aire, ya que las tasas de emisión utilizadas son estimadas mediante técnicas de inventario de emisiones. La sustancia a modelar es el material particulado, fracción de 10 μm (PM10). Es un contaminante atmosférico emitido en todo proceso de combustión y que afecta a las vías respiratorias disminuyendo la capacidad pulmonar de las personas expuestas al mismo (Porta 2018).

Tabla I: Descripción de fuentes modeladas

Fuente	Latitud	Longitud	Altura $[m]$	Diámetro $[m]$	Temperatura de salida $[K]$	Velocidad de salida $[m/s]$	Tasa de emisión PM10 $[mg/s]$
Polo petroquímico	34º53’11.04’’S	57º54’51.12’’O	90	5,13	514	9,1	1.178,9
Central termoeléctrica	34º51’35.25’’S	57º57’20.88’’O	45	7	395,2	19,4	246,1
Parque Industrial	34º59’27.6’’S	58º6’20.5’’O	20	1	358	7,3	43,86

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos con la simulación del periodo 2012 al 2016 con 3 fuentes en simultáneo. Los resultados se expresan como la probabilidad de que los valores de concentración en la atmosfera sean mayores a cero. Para generar estos mapas se calcula en primer lugar la cantidad de veces que se obtiene una concentración mayor que cero, en cada punto de retícula, con una resolución temporal de una hora. Luego se calcula la probabilidad empírica, dividiendo los valores de la matriz de frecuencias obtenidas por el número de horas transcurridas desde el inicio de la simulación.

La Figura 1 muestra el mapa de probabilidades anual y de cada estación del año. Se puede observar en la “Fig. 1-a” que los valores de probabilidad más altos se encuentran al oeste, suroeste de las fuentes de emisión, cubriendo casi en su totalidad al casco urbano y alrededores de la ciudad de La Plata. La presencia de un máximo en cercanías del Parque Industrial se debe a la baja altura de la chimenea y la menor temperatura de salida de los gases, que resultan en una emisión con poca elevación y mayor impacto en superficie. En cambio, las otras dos fuentes, al tener alturas más elevadas y mayores temperaturas de salida de los gases, distribuyen el material emitido en áreas más extensas y alejadas de las fuentes.

Al observar la “Fig. 1 b-e” vemos que las estaciones de otoño y verano presentan los mayores valores de probabilidad dentro del casco urbano. En contraposición, es la temporada invernal la que presenta los valores más bajos de las cuatro estaciones del año.

En la Figura 2 se muestran los mapas de probabilidades que las concentraciones sean mayor que cero, para el promedio anual de los años 2013 y 2016, respectivamente. Se pueden apreciar diferencias entre ambos casos que demuestran que puede haber una importante variabilidad entre diferentes años en la distribución de las concentraciones en la región. Podemos observar en la “Fig. 2.a” un resultado similar al del promedio del periodo 2012-2016, mientras que en la “Fig. 2.b” se aprecian mayores probabilidades hacia la parte oeste de la región y valores de probabilidad menores en el sector sur del casco urbano.

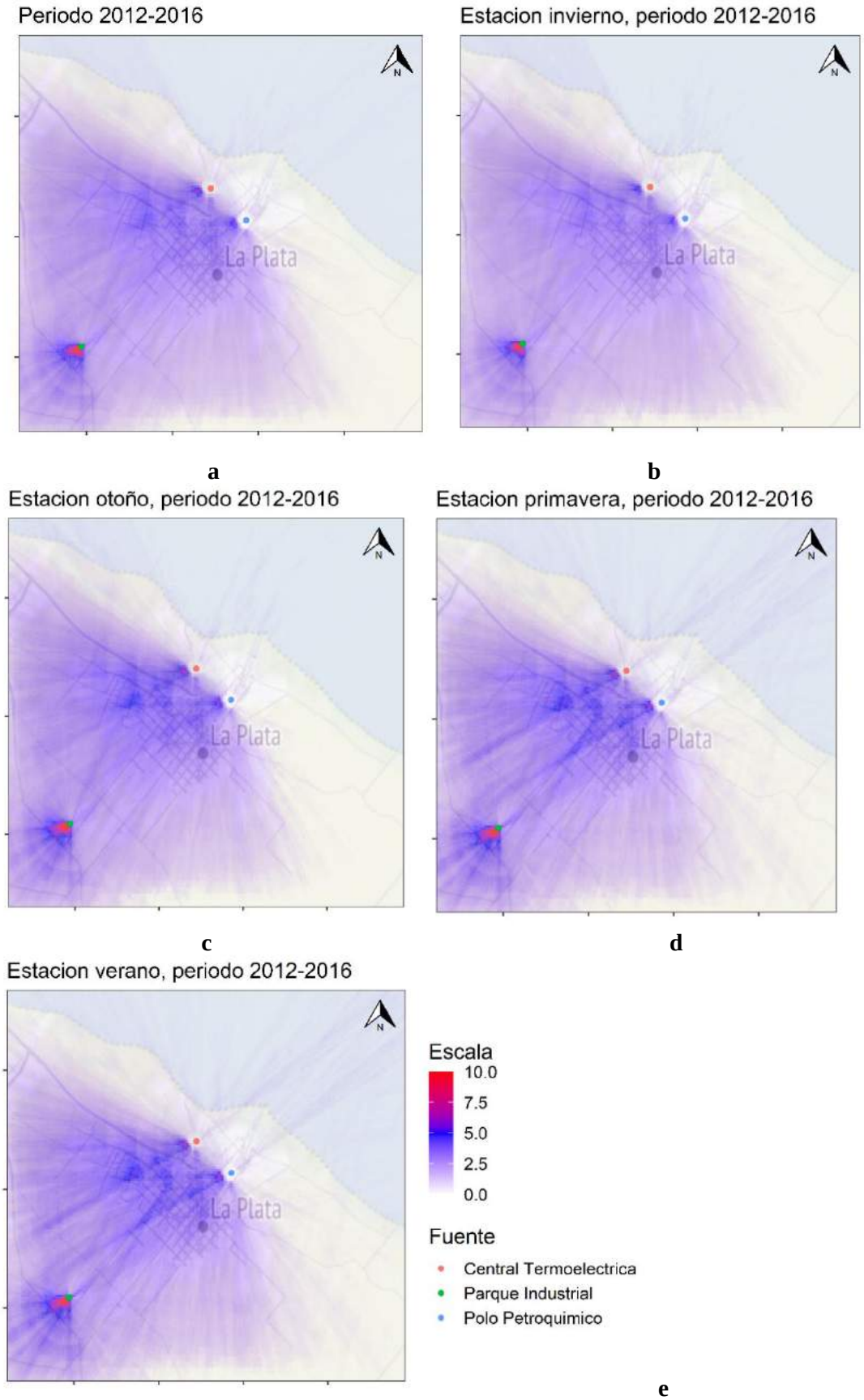
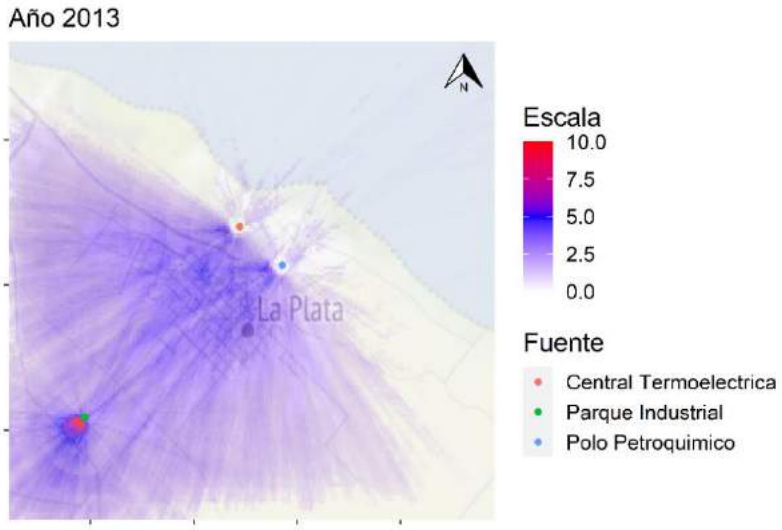
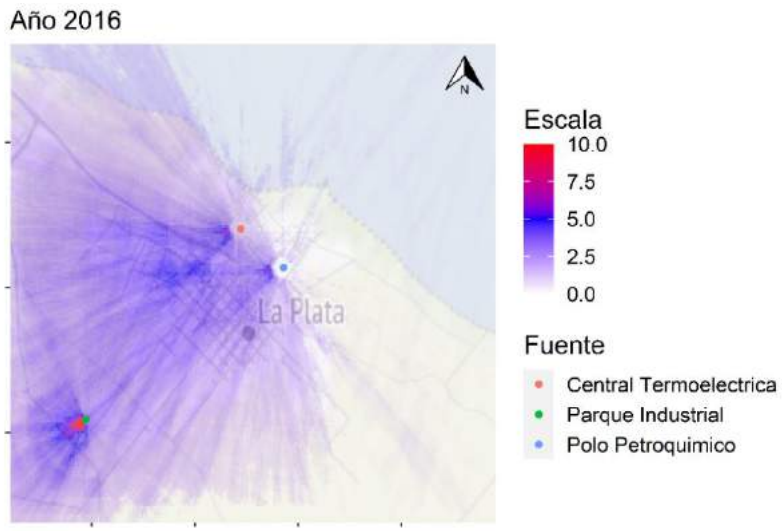


Figura 1. Probabilidad que la concentración resultante sea mayor que cero en el a) promedio anual, b) promedio de invierno, c) promedio de otoño, d) promedio de primavera, d) promedio de verano, del periodo 2012-2016.



a



b

Figura 2. Probabilidad que la concentración resultante sea mayor que cero para el promedio anual a) año 2013 y b) año 2016

CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Al observar de la "Fig. 1" es evidente que la región del Gran La Plata se ve afectada por las emisiones de material particulado desde el Polo Petroquímico y la Central Termoeléctrica. El trabajo de Berri et al. 2012, ha demostrado que el viento en la región se ve dominado por la circulación de brisa mar-tierra, con una mayor frecuencia de vientos del sector Este. Debido a esta condición meteorológica las bocanadas, que son transportadas a sotavento de las fuentes, impactan en el casco urbano y alrededores, en las zonas más pobladas.

El viento es una variable meteorológica de gran variabilidad, por lo cual es de esperarse que se encuentren diferencias interanuales como el ejemplo de los años 2013 y 2016 (ver Fig. 2). Es por eso importante que los estudios de calidad de aire cuenten con una buena base de datos meteorológicos para garantizar resultados más representativos.
Se han encontrado diferencias considerables en la extensión del área de incidencia de las fuentes de acuerdo a su altura. Si bien no es posible distinguir en los mapas el aporte del Polo Petroquímico y la Central Termoeléctrica, es evidente que el Parque Industrial tiene una zona de impacto muy cercana y contribuye con frecuencias más altas.
El empleo de los modelos numéricos para el estudio de calidad del aire es una buena práctica. Como muestran los resultados del trabajo, es posible abarcar áreas extensas y periodos de tiempo prolongados, lo que permite realizar análisis detallados de las condiciones medias a escala regional. Los modelos deben realizar diferentes suposiciones acerca del comportamiento atmosférico, el transporte y la dispersión de los contaminantes para poder funcionar. Por lo tanto, es recomendable validar los resultados que proporcionan los modelos para lo cual es necesario disponer de mediciones de redes de monitoreo, como así también los parámetros de emisión de las fuentes consideradas

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha recibido apoyo parcial del proyecto PICT2017-1670. Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar las observaciones de la estación Ezeiza Aero. J.A. Diaz agradece a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata el otorgamiento de una Beca de Incentivo a la Investigación.

REFERENCIAS

Arrieta, N., Bazán, J. M., Sacheto, V., Reyna Almandos, J., & Salas, E. M., Calidad de las aguas de Lluvia en la region del Gran La Plata. Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina, Tomo III. PROIMCA-PRODECA. E. Puliafito et al. (Eds.). Universidad Tecnológica Nacional. ISBN 978-950-42-0163-2. (2015)

Berri, G.J., Sraibmam, L., Tanco R., and Bertossa G., Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, doi: 10.1175/ 2010JAMC2370.1. (2010)

Berri, G. J., Nuin, J. S. G., Sraibman, L., and Bertossa, G. Verification of a synthesized method for the calculation of low-level climatological wind fields using a mesoscale boundary-layer model. *Boundary-layer meteorology*, 142(2). (2012)

Berri, G.J., and Bertossa, G., Initializing a mesoscale boundary layer model with radiosonde observations. *Boundary Layer Meteorology*, 166, doi: 10.1007/s10546-017-0295-5. (2017)

Berri, G.J., and Dezzutti, M., A sea breeze case study in the La Plata River region using local observations, satellite images and model simulations. *Boundary Layer Meteorology*, 177, doi: 10.1007/s10546-020-00548-3. (2020)

Blanco, J. and Berri, G. New indices for the spatial validation of plume forecasts with observations of smoke plumes from grassfires, Atmospheric Environment, 67, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.10.061 (2013)

Briggs, G. A. Diffusion estimation for small emissions. *Preliminary report* (No. TID-28289). National Oceanic and Atmospheric Administration. Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab. (1973)

Chico, T., and Catalano, J. Addendum to the User's Guide for MPTER (No. PB-86-217163/XAB). Aerocomp, Inc., Costa Mesa, CA (USA). (1986)

Colman Lerner, J. E., Morales, A., Aguilar, M., Giuliani, D., Ditondo, J., Dodero, V.I., Massolo, L., Sánchez, E. Y., Matamoros, N., and Porta, A. The effect of Air Pollution on Children's

Health: a Comparative Study between La Plata and Bahía Blanca, Buenos Aires Province, Argentina. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 181, 978-1- 84564-762- 9. (2014a)

Colman Lerner, J. E., Kohajda, T., Aguilar, M. E., Massolo, L. A., Sánchez, E. Y., Porta, A. A., Opitz, P., Wichmann, G., Herbarth, O., and Mueller. A. Improvement of health risk factors after reduction of VOC concentrations in industrial and urban areas. *Environmental Science and Pollution Research International* 21, 9676-9688. (2014b)

Golder, D. Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 3. (1972)

Holland, J. Z., A meteorological survey of the Oak Ridge area, USAEC Report 0110-99. Oak Ridge National Laboratory, pp. 554-559 (1953).

Huamán Pio, J. M. Modelamiento de La Dispersión del Material Particulado de La Chimenea de Fundición de La Refinería de Estaño. (2017)

Jacobson, M. Z., Fundamentals of atmospheric modeling. *Cambridge university press*. (2005)

Kahle D. and Wickham H. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. *The R Journal*, 5, 144-161. URL http://journal.r-project.org/archive/2013-1/kahle-wickham.pdf

Myllyvirta, L., Farrow, A., Fuentes, C., y Fernández, A. Impactos de las emisiones de las termoeléctricas a carbon en la calidad del aire en las comunas de Huasco y Puchuncaví. (2020)

Orille Fernández, A. L. Centrales eléctricas: introducción al sector eléctrico y al sistema de energía eléctrica, centrales hidroeléctricas, centrales térmicas. (1996)

Orte, M. A., Coman Lerner, J., Gutiérrez, M., Elordi, L., Matamoros, N., Reyna Almandos, & J., Porta, A. Estudio de hidrocarburos aromáticos policíclicos asociados al material particulado y en fase gaseosa en la ciudad de La Plata y alrededores. *Libro de Actas de PROIMCA*. (2015)

Pasquill F., Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources, Ellis Horwood Lt., 2nd. Edition. New York. (1974)

Porta, A., Sanchez, E. Y., & Colman Lerner, J. E. Calidad del aire. *Series: Libros de Cátedra*. (2018)

Represa, S., Mellado, D., Bali, L., Lerner, C., Esteban, J., Sánchez, Y., & Porta, A. A. Aplicación de tecnologías de sistemas de información geográfica (SIG) para la estimación del riesgo por exposición a compuestos orgánicos volátiles (COVs). *III Congreso de la Sociedad de Análisis de Riesgo Latinoamericana* (SRA-LA). (2016)

Represa, N. S. Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos (Doctoral dissertation). (2020)

Sharan, M., Krishna, T. R., and Panda, J., Relations among stability parameters in the stable surface layer: Golder curves revisited. *Atmospheric Environment*, 39, 5619-5623. (2005)

Sraibman, L., and G.J.Berri., Low level wind forecast over La Plata River region with a mesoscale boundary layer model forced by regional operational forecasts, *Boundary Layer Meteorology*, 130, doi: 10.1007/s10546-009-9350-1. (2009)

Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. (2016)

Wickham H., Francois R., Henry L., and Miller K. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.8.5. https://CRAN.R-project.org/package=dplyr (2020)

World Health Organization (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. WHO European Centre for Environment and Health, Bonn, WHO 2013. 309 pp.

World Health Organization. Global report on urban health: equitable, healthier cities for sustainable development. (2016 a)

World Health Organization. Health as the pulse of the new urban agenda: United Nations conference on housing and sustainable urban development. (2016 b)

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS AGUAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN UNA CUENCA DEL FALDEO NORTE DEL SISTEMA SERRANO DE TANDILIA

Dipardo B.[a,b], Barranquero R. S.[a,c], Varni M. R.[d], Landa R.[e], Etcheverria S. G.[f] y Ruiz de Galarreta V. A.[a]

[a]*Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales-CIC, FCH, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA*
[c]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA*
[d]*Instituto de Hidrología de Llanuras-CIC, ARGENTINA*
[e]*Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA*
[f]*Facultad de Ciencias Económicas y Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: brunodipardo@gmail.com

RESUMEN

El trabajo se realizó en la cuenca del arroyo Chapaleofú, cuyas nacientes se ubican en el faldeo Norte del sistema serrano de Tandilia en el centro-sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). La importancia del estudio de esta cuenca rural radica en dos causas principales: por un lado, corresponde a la región pampeana en la cual la funcionalidad de los ecosistemas se modificó fuertemente para lograr mayor productividad agrícola-ganadera, siendo los recursos hídricos uno de los componentes más afectados por ese cambio; por otra parte, esta cuenca es representativa de otras cuencas serranas de la región cuyos arroyos son únicos relictos de ciertas especies acuáticas en la provincia de Buenos Aires. El objetivo fue la caracterización fisicoquímica del recurso hídrico superficial en la totalidad de la cuenca, teniendo en cuenta que sólo existen antecedentes parciales de este tipo de estudio. Para ello se realizó un muestreo de cuatro días consecutivos en octubre de 2019; se determinó el caudal y se tomaron muestras de agua superficial en doce sitios representativos de la cuenca principal y de sus cuencas menores de aporte. En el campo se realizaron determinaciones de: conductividad, pH, temperatura, oxígeno disuelto y carbonatos/bicarbonatos. En el Laboratorio de Análisis Bioquímicos y Minerales, de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, se determinaron: cloruros, sulfatos, nitratos, calcio, magnesio, sodio, potasio y dureza. Se registraron a su vez los usos de suelo aledaños a los sitios de toma de muestras. En términos generales puede señalarse que: el pH fue alcalino en todos los casos, el oxígeno disuelto mostró un promedio de 84%, los valores de cloruros fueron inferiores a 60 mg/l y los de nitratos fluctuaron entre 15 y 29 mg/l, infiriéndose en principio que no habría rasgos indicativos de contaminación.

Palabras Clave: Agua superficial, Muestreo de aguas, Química del agua, Uso de la tierra, Medio ambiente

INTRODUCCION

En la llanura pampeana argentina desde la década de 1990 y comienzos del nuevo siglo una intensificación agrícola estuvo acompañada por una intensificación de los planteos ganaderos. Este nuevo escenario impuso una alta densidad de animales sometidos a un engorde a corral (conocido como feed-lot) con granos y forrajes procesados. La agricultura aporta la mayor parte de los insumos que requiere la ganadería, y ambas actividades, que antes se articulaban en esquemas extensivos de rotación de cultivos, ahora aparecen desacopladas y altamente especializadas, inclusive con administraciones independientes (Vigglizo E.F., 2007). Tal cambio introdujo una modificación adicional en la funcionalidad de estos ecosistemas que, para sostener una mayor productividad, reciben más insumos (fertilizantes y pesticidas) y generan más residuos y desechos que afectan al ambiente en general y a los recursos hídricos en particular (Vigglizo E.F., 2008). La agricultura es la base de la alimentación mundial (FAO, 2018) pero produce impactos negativos de diversas maneras y en distintos niveles sobre los recursos naturales (Goudie A., 2013). Sus principales impactos son: degradación de suelos; afectación de ecosistemas terrestres y acuáticos; contaminación de aguas superficiales y subterráneas: presión sobre la oferta hídrica natural; y, en algunas situaciones, disminución de la calidad del aire (Shiferaw et al, 2005). La contaminación de recursos hídricos subterráneos y superficiales, está asociada a la aplicación de agroquímicos, principalmente fertilizantes y pesticidas, que son transportados de diferentes maneras hasta los cuerpos hídricos. A este tipo de contaminación se la denomina contaminación difusa por agroquímicos (Custodio et al, 2012), y se refiere a los contaminantes que afectan los cuerpos hídricos y que provienen de fuentes no puntuales bien sea de origen urbano o rural (Ferrier et al, 2005).

En este contexto la elaboración de un diagnóstico de la situación ambiental del recurso hídrico superficial realizado a través de la información recolectada en redes de monitoreo es la base para la elaboración de planes, programas y proyectos para realizar una gestión ambientalmente sustentable.

En el enfoque de los recursos hídricos como sistemas complejos y dinámicos, en el cual las actividades humanas son inherentes a los mismos, cobra importancia integrar los aspectos naturales y sociales para mejorar su comprensión; sobre todo al advertir el dominio en la investigación por parte de hidrólogos, con una contribución limitada y posiblemente insuficiente de científicos sociales (Krueger et al, 2016; Xu et al, 2018).

En el partido de Tandil diversos estudios antecedentes se han realizado sobre el recurso hídrico superficial. Cortelezzi A., 2012 realizó la caracterización fisicoquímicas de los siete arroyos del partido de Tandil incluyendo cuatro sitios de muestreo en el arroyo Chapaleofú Grande y dos en el Chapaleofú propiamente dicho. Ruiz de Galarreta et al, 2013 determinaron la calidad del curso superficial que conforma el arroyo Langueyú, de características urbanas. Boguetti L., 2015 realizó un diagnóstico ambiental de la cuenca alta del arroyo Langueyú. Rodriguez et al, 2016 realizaron un estudio en la cuenca rural del arroyo Napaleofú, en el cual caracterizaron la hidrología básica de la cuenca alta, tanto en agua superficial como subterránea. Banda Noriega et al, 2018 analizaron para el partido de Tandil la concentración de agroquímicos en los arroyos del mismo, con un sitio de muestreo en el arroyo Chapaleofú. No existen por ende trabajos antecedentes que evalúen el recurso hídrico del arroyo Chapaleofú en su extensión completa. En este contexto el objetivo del presente trabajo fue la caracterización fisicoquímica del recurso hídrico superficial en la totalidad de la cuenca.

MÉTODO O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Este partido cuenta con una superficie de 4.836 km², dentro de la cual se identifican ocho cuencas hidrográficas (ver Fig. 1 y Tabla I) cuyos arroyos tienen sus nacientes en los ambientes serranos del sistema de Tandilia (Ruiz de Galarreta et al, 2005). Estas cuencas presentan una extensión regional, es decir que sus límites están por fuera de los límites del partido, y se encuentran dentro de la región hidrogeológica serrana que se corresponde con los dos sistemas serranos de la provincia, Tandilia y Ventania (Gonzalez N., 2005). La cuenca que se estudió en este trabajo fue la del arroyo Chapaleofú que nace en las Sierras de Tandil y cuyas aguas fluyen con dirección NE hacia la depresión del Río Salado. La misma se desarrolla predominantemente en el espacio rural y cuenta con los asentamientos de Azucena, María Ignacia (Estación Vela), Gardey y La Pastora que poseen las características típicas de concentraciones de población rural, como el desarrollo económico vinculado a actividades agropecuarias. En dichos asentamientos se hace uso del recurso subterráneo para consumo humano y para la mayoría de las actividades antrópicas, por lo que el recurso superficial es utilizado puntualmente con fines recreativos y para bebida del ganado. Esta cuenca presenta dos subcuencas: la del arroyo Chapaleofú Chico y la del arroyo Chapaleofú Grande. La cuenca del arroyo Chapaleofú es la de mayor extensión del partido.



Figura 1. Cuencas hidrográficas del partido de Tandil.

Tabla I. Superficie de cuencas del partido de Tandil.

Cuenca	Superficie (km)
A° de Los Huesos	628
A° Chapaleofú	1.484
A° Langueyú	687
A° El Perdido	193
A° Tandileofú	314
A° Las Chilcas	461
A° Napaleofú	723
A° Quequén Chico	346

Los sectores geomorfológicos definidos para el partido de Tandil (serranías, piedemonte y llanura) encuentran su correspondencia en el área de estudio. El sector de serranías se caracteriza por la presencia de sierras, cerros aislados y valles, relacionados con la presencia de bloques elevados por fallas directas. En este sector se encuentran las más altas pendientes y los valles de los cursos de aguas se hallan bien definidos, y dentro de él se ubican las subcuencas de los arroyos Chapaleofú Chico y Chapaleofú Grande. El piedemonte se ubica en forma continua a las serranías, se caracteriza por tener un ángulo de pendiente más suave que el sector anterior; se observa la presencia de bloques de gran tamaño y conos aluviales, y el drenaje presenta un diseño distributario. La última unidad morfológica es la llanura, reconocida hacia el NE por la presencia de pendientes muy suaves. Es una zona de acumulación y transporte de materiales más finos, con fuerte predominio de sedimentos de origen eólico. El drenaje es poco definido y pobremente integrado, con cauces estrechos y cursos temporarios que en ciertos casos desaparecen en suaves depresiones (Ruiz de Galarreta et al, 2005). Siguiendo los criterios utilizados en la delimitación de los sectores geomorfológicos de la cuenca del arroyo Langueyú (Ruiz de Galarreta et al, 2011) se ubicó en el presente trabajo al sector de serranías por encima de los 170 msnm, al sector de piedemonte entre los 170 y 140 msnm y al de llanura por debajo de los 140 msnm.
A pesar de contar con varios cursos superficiales, la mayoría de éstos son temporarios y prácticamente no hay en el partido de Tandil cuerpos de agua lenticos.

Metodología

La metodología consistió en definir los sitios de muestreo en el arroyo Chapaleofú y sus tributarios: el arroyo Chapaleofú Chico y el arroyo Chapaleofú Grande. Estos sitios debían tener representación en los distintos sectores geomorfológicos. Para obtener información preliminar sobre los sitios a analizar, se efectuó un muestreo exploratorio programado a partir de la inspección previa de cartografía satelital, el cual permitió evaluar la accesibilidad al arroyo Chapaleofú y sus tributarios.
Para la ubicación precisa de cada uno de estos sitios, se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el que se archivaron las coordenadas geográficas. El muestreo en el que se basa este estudio fue realizado en el mes de octubre de 2019.
Las determinaciones físico-químicas efectuadas para la caracterización básica del sistema hidroquímico contemplaron: conductividad eléctrica (CE), temperatura, pH, oxígeno

disuelto (OD), carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, calcio, magnesio, potasio y sodio.
En cada punto de muestreo se determinaron *in situ* los valores de temperatura, pH, CE y OD, considerando la susceptibilidad que presentan respecto a los cambios ambientales (Appelo C.A.J. and Postma D., 1993), utilizando el medidor multiparamétrico Aquacombo HM3070. Los carbonatos y bicarbonatos también se determinaron en campo, inmediatamente después de la toma de muestra, utilizando el método de titulación (APHA, 2005). Para el resto de las determinaciones se extrajeron muestras de agua que fueron debidamente refrigeradas y luego analizadas en el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos y Minerales (LabyM) de la Facultad de Ciencias Veterinarias (UNICEN). Las muestras se envasaron en recipientes de 1 litro de PET (Polietileno Tereftalato) que, a diferencia de otros plásticos como el polietileno, no permite la difusión de gases (Castany G., 1975). Las muestras de agua se tomaron en puntos con buena circulación y mezclado, evitando las aguas estancadas y tratando de no recoger partículas tales como hojas y sedimentos. Las extracciones se realizaron de frente a la corriente, sumergiendo los envases a una profundidad aproximada de 20 cm, con la boca ligeramente inclinada hacia arriba. Una vez llenos, se cerraron bajo el agua.
En los 12 puntos de muestreo se realizó el aforo de caudal mediante la técnica del flotador. En cada sitio se relevaron mediante observación directa los usos de suelo a ambos lados del arroyo y aguas arriba de éste.
Se obtuvieron a partir de los datos fisicoquímicos medidas de resumen que incluyeron: mínimo, primer cuartil, mediana, promedio, tercer cuartil y máximo. Se realizó una matriz de correlaciones utilizando el software Rstudio entre los distintos parámetros fisicoquímicos analizados y el caudal, para evaluar las relaciones existentes entre ellos. Se elaboró el diagrama de Piper para conocer la tipificación de las aguas del arroyo.
Se realizó mediante el software Infostat el análisis de la varianza del ion nitrato con respecto a los diferentes usos de suelo. Se utilizó el ion nitrato ya que es un indicador de contaminación orgánica, ya sea por el uso de fertilizantes o por excremento de animales. Si bien no hubo casos en que la concentración de nitratos superarara el valor de referencia establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) de 50 mg/l, se relacionó el uso de suelo preponderante en cada sitio con la concentración de nitratos para analizar si los diferentes tipos de uso de suelo influyen en sus variaciones de concentración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red monitora quedó constituida por doce sitios de muestreo, 6 se ubican en la subcuenca del arroyo Chapaleofú Grande, 3 en la subcuenca del arroyo Chapaleofú Chico y las 3 restantes en el Chapaleofú propiamente dicho (ver Fig. 2), que se forma luego de la unión de los arroyos antes mencionados. En cuanto a los sectores geomorfológicos, 7 sitios de muestreo se ubican en las serranías, 3 en el piedemonte y 2 en la llanura.
Los valores de CE se encontraron entre 597 y 735 $\mu S/cm^{-1}$, aumentando desde el sector de serranías hacia el sector de llanura, y su promedio fue de 680 $\mu S/cm^{-1}$. El pH osciló entre 7,7 y 8,5 siendo básico en todos los casos y con un promedio de 8,1. El aumento también ocurrió en el sentido del flujo. La temperatura varió de 18 a 21°C. Los bicarbonatos variaron de 384 a 683 mg/l aumentando en el sentido del flujo y con un promedio de 541 mg/l. En cuanto a los carbonatos no se encontraron en 5 de los 7 sitios de las serranías y en los 2 que se encontraron presentaron valores bajos (75 y 95 mg/l). La concentración de bicarbonatos aumentó en el sentido del flujo en los sectores

geomorfológicos de piedemonte y llanura con valores entre 80 y 180 mg/l, con un promedio de 148 mg/l en ambos sectores.

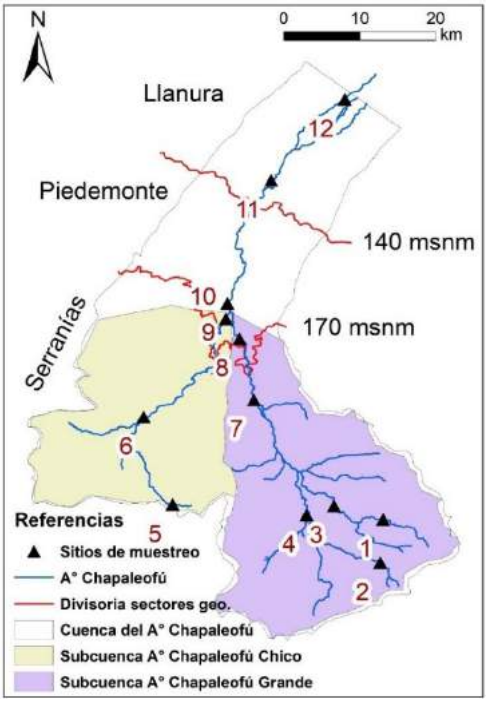


Figura 2. Red monitora de agua superficial.

Tabla II. Estadísticos descriptivos para el conjunto de datos fisicoquímicos (campaña de octubre de 2019).

	n	Mínimo	Primer cuartil	Mediana	Promedio	Tercer cuartil	Máximo
Carbonatos	12	0,00	0,00	77,50	75,83	152,50	180,00
Bicarbonatos	12	384,30	469,70	530,70	541,40	658,80	683,20
CE	12	597,00	628,50	694,50	680,10	706,50	788,00
pH	12	7,73	8,01	8,19	8,14	8,28	8,45
T	12	18,10	18,88	19,60	19,75	20,93	21,40
OD	12	65,00	75,17	78,45	83,71	83,55	142,00
Calcio	12	39,84	51,03	54,17	72,15	84,16	197,21
Magnesio	12	6,29	21,87	23,52	22,91	26,34	29,39
Sodio	12	2,44	38,46	55,75	53,78	74,87	109,00
Potasio	12	3,70	5,46	9,19	11,16	14,19	25,96
Dureza	12	315,00	385,00	435,00	443,80	540,00	560,00
Cloruros	12	27,99	31,49	35,99	37,16	39,99	55,98
Nitratos	12	15,27	18,40	21,41	21,77	24,35	29,55
Sulfatos	12	6,44	9,45	11,92	11,16	13,28	13,98

El OD presentó un promedio de 84% con valores que se encontraron entre 65 y 142%. El calcio disminuyó en el sentido del flujo, con valores entre 40 y 197 mg/l. Su promedio fue de 72 mg/l. El magnesio presentó valores entre 29 y 21 mg/l con una leve tendencia a disminuir su concentración hacia la llanura, su concentración promedio fue de 23 mg/l. El sodio presentó valores entre 2 y 109 mg/l con un promedio de 54 mg/l. Los valores

más bajos se encontraron en el sector de serranías mientras que los más altos se encontraron en la llanura.
El potasio presentó sus mayores valores en la cabecera y los valores más bajos en la llanura, se mantuvo en el rango de 4 a 26 mg/l, con un promedio de 11 mg/l. La dureza aumentó en el sentido de flujo del agua, presentó valores entre 315 y 560 mg/l, con un promedio de 444 mg/l.
Los cloruros presentaron un promedio de 37 mg/l con un máximo de 56 mg/l y un mínimo de 28 mg/l. No se logró identificar un patrón de distribución de cloruros a lo largo del arroyo.
La concentración de nitratos osciló entre 15 y 30 mg/l con un promedio de 22 mg/l. No se encontró un patrón en su distribución y sus valores más altos se hallaron en los sitios de muestreo 4 y 5, ubicados en el sector de serranías.
Los sulfatos presentaron un valor promedio de 11 mg/l con valores entre 6 y 14 mg/l.

Tabla III. Matriz de correlaciones de parámetros fisicoquímicos y caudal.

	Bicarbonatos	Calcio	Carbonatos	Caudal	CE	Cloruros	Dureza	Potasio
Bicarbonatos	1,00	-0,31	0,47	0,62	0,47	-0,21	1,00	-0,45
Calcio	-0,31	1,00	-0,49	-0,56	-0,56	0,25	-0,31	0,34
Carbonatos	0,47	-0,49	1,00	0,66	0,22	-0,32	0,47	-0,67
Caudal	0,62	-0,56	0,66	1,00	0,45	-0,31	0,62	-0,45
CE	0,47	-0,56	0,22	0,45	1,00	-0,05	0,47	-0,43
Cloruros	-0,21	0,25	-0,32	-0,31	-0,05	1,00	-0,21	-0,33
Dureza	1,00	-0,31	0,47	0,62	0,47	-0,21	1,00	-0,45
Potasio	-0,45	0,34	-0,67	-0,45	-0,43	-0,33	-0,45	1,00
Magnesio	0,15	-0,22	0,41	0,15	0,45	0,44	0,15	-0,74
Sodio	0,31	-0,41	0,15	0,32	0,40	-0,54	0,31	0,04
Nitratos	-0,44	-0,25	-0,41	-0,54	0,06	0,08	-0,44	0,24
OD	-0,47	0,24	-0,07	-0,40	-0,37	0,75	-0,47	-0,31
pH	0,35	-0,42	0,79	0,76	0,44	-0,05	0,35	-0,77
Sulfatos	0,47	-0,54	0,32	0,63	0,92	-0,11	0,47	-0,47
Temperatura	0,23	0,38	0,05	-0,29	-0,20	-0,07	0,23	0,00

	Magnesio	Sodio	Nitratos	OD	pH	Sulfatos	Temperatura
Bicarbonatos	0,15	0,31	-0,44	-0,47	0,35	0,47	0,23
Calcio	-0,22	-0,41	-0,25	0,24	-0,42	-0,54	0,38
Carbonatos	0,41	0,15	-0,41	-0,07	0,79	0,32	0,05
Caudal	0,15	0,32	-0,54	-0,40	0,76	0,63	-0,29
CE	0,45	0,40	0,06	-0,37	0,44	0,92	-0,20
Cloruros	0,44	-0,54	0,08	0,75	-0,05	-0,11	-0,07
Dureza	0,15	0,31	-0,44	-0,47	0,35	0,47	0,23
Potasio	-0,74	0,04	0,24	-0,31	-0,77	-0,47	0,00
Magnesio	1,00	-0,47	-0,20	0,34	0,64	0,51	-0,14
Sodio	-0,47	1,00	0,35	-0,45	-0,03	0,22	0,24
Nitratos	-0,20	0,35	1,00	0,19	-0,50	-0,21	0,12
OD	0,34	-0,45	0,19	1,00	-0,03	-0,42	0,11
pH	0,64	-0,03	-0,50	-0,03	1,00	0,64	-0,28
Sulfatos	0,51	0,22	-0,21	-0,42	0,64	1,00	-0,43
Temperatura	-0,14	0,24	0,12	0,11	-0,28	-0,43	1,00

 ISBN 978-987-1323-66-1

Se consideraron correlaciones significativas aquellas que fueron mayores a 0,5. El calcio y el sodio presentaron una correlación negativa que explicaría el intercambio catiónico entre los dos iones pero no llega a ser significativa. Vemos que el caudal tiene una correlación significativa negativa con el calcio, debido a que a medida que aumenta el caudal y el recorrido del agua superficial por la cuenca el calcio es reemplazado por el sodio. Por la misma razón el sodio presenta una correlación positiva con el caudal aunque no llega a ser significativa. Los carbonatos presentan una correlación significativa positiva con el pH, lo cual es lógico, debido a que los carbonatos son inestables a pH menores a 8,3.
Los sulfatos presentan una correlación positiva con la CE ya que ambas aumentan en el sentido del flujo.
En cuanto a la tipificación de las aguas todas las muestras (ver Fig. 3), excepto la correspondiente al sitio 5, son bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas con tendencia a bicarbonatadas sódicas en la llanura (sitios 11 y 12).

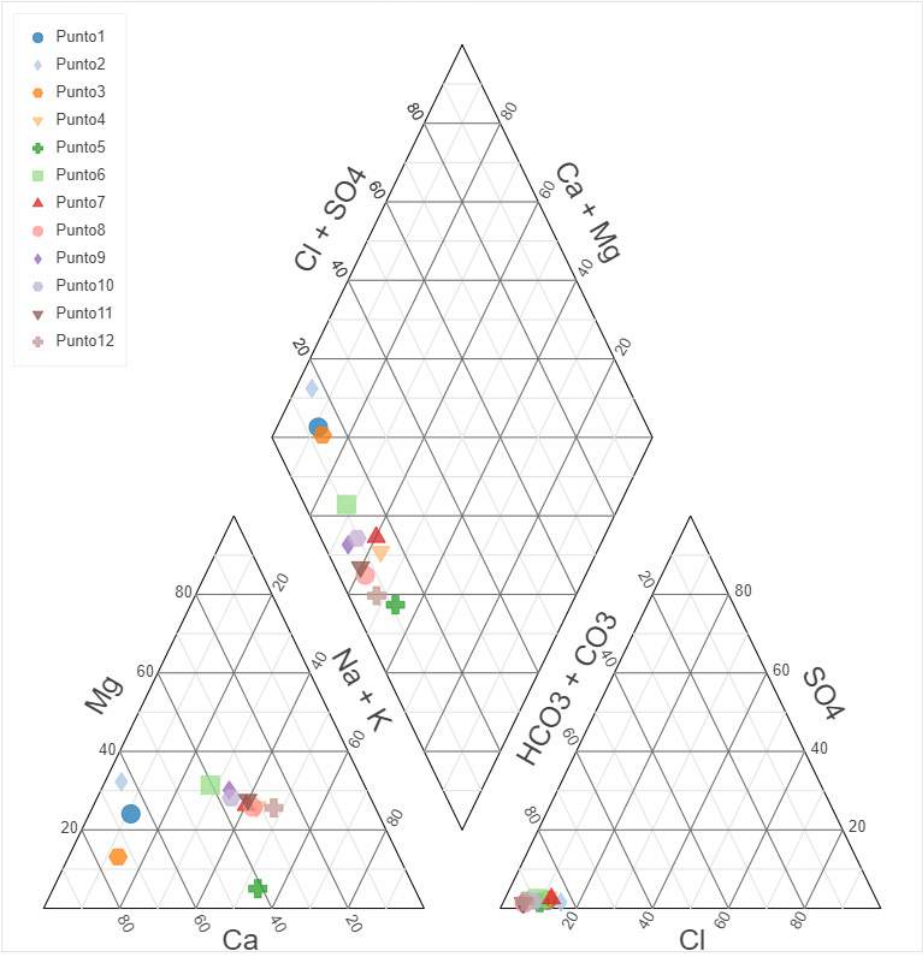


Figura 3. Diagrama de Piper para el arroyo Chapaleofú.

A continuación se representan los caudales (m^3/seg) medidos el día 31 de octubre de 2019 en cada uno de los sitios de muestreo (ver Fig. 4)

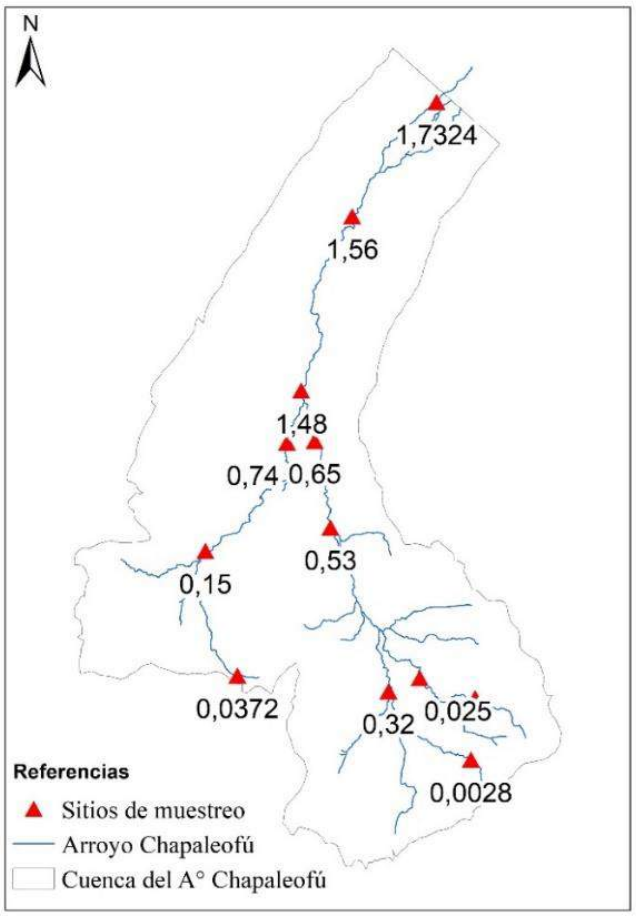


Figura 4. Caudal (m³/seg) en los diferentes sitios de muestreo.

En el sector de serranías cuatro sitios presentaron un uso de suelo preponderantemente ganadero y tres un uso agrícola; en el sector de piedemonte, los tres sitios presentaron un uso agrícola; y en el sector de llanura los dos sitios muestreados presentaron un uso ganadero. Se realizó el análisis de la varianza (ANAVA) del ion nitrato para conocer si hay diferencias significativas en el comportamiento del mismo dentro de cada tipo de uso de suelo. La hipótesis nula es que las medias de nitratos dentro de cada tipo de uso de suelo son iguales, es decir que las diferencias que se observan son producto del azar. Si el p-valor se encuentra por encima de 0,05 no hay evidencia estadística para descartar la hipótesis nula. En el caso analizado el p-valor fue de 0,5871, por lo que no se encontró una relación estadísticamente significativa entre la concentración de nitratos y los diferentes usos de suelo relevados.

Tabla IV. Análisis de varianza (ANAVA) del ion nitrato en relación a los diferentes usos de suelo.

	p-valor
Uso de suelo preponderante	0,5871

No se encontraron concentraciones de nitratos superiores al valor de referencia establecido por la OMS (50 mg/l), por lo que no se detectaron rasgos indicativos de contaminación. De todas formas, Cortelezzi A., 2012 obtuvo un promedio de 2,2 mg/l para la concentración de nitratos en 2012 en el arroyo Chapaleofú Chico y el Chapaleofú propiamente dicho. Se infiere que el aumento en la concentración de nitratos detectado

en este trabajo podría deberse a una mayor aplicación de fertilizantes en la actualidad. Los valores mínimos y máximos de nitratos fueron 15,3 y 29,6 mg/l respectivamente, siendo similares a los detectados en la cuenca del arroyo Napaleofú: 23,8 y 39,4 mg/L. El contenido de nitratos no presentó una evolución en relación al sentido del flujo y los sitios que mayor concentración de nitratos presentaron fueron el 5 y el 6, ambos correspondientes a la subcuenca del arroyo Chapaleofú Chico, lo cual puede deberse a que en esa zona exista una mayor concentración de cultivos con aplicación de agroquímicos ricos en nitrógeno. En la cuenca urbana del arroyo Langueyú, según el estudio de Ruiz de Galarreta et al, 2013 el promedio de nitratos fue de 58,2 mg/l para la campaña de mayo de 2011, mucho más alto que promedio para el arroyo Chapaleofú que fue de 21,8 para octubre de 2019. Esta diferencia podría deberse a que la cuenca del arroyo Langueyú se asienta sobre la ciudad de Tandil y por lo tanto es afectada por otras actividades humanas con vuelco de efluentes al arroyo como industrias alimenticias.
A su vez, Banda Noriega et al, 2018 detectaron bajas concentraciones de todos los agroquímicos determinados (Atrazina; 2,4-D; Acetoclor; Imazapir; Glifosato; AMPA) en los cursos superficiales del partido de Tandil, a excepción de acetoclor que no se detectó en uno de los cursos. Se constató que los niveles fueron inferiores a los valores de referencia para agua de bebida humana para los casos que existen estas referencias (atrazina, 2,4 D y glifosato).
La CE varió desde 597 $\mu S/cm^{-1}$ en la serranías a 788 $\mu S/cm^{-1}$ en la llanura, con valores similares a los establecidos para el arroyo Napaleofú (Rodríguez et al, 2016) donde esta varió entre 460 y 880 $\mu S/cm^{-1}$ aumentando desde las nacientes hasta la desembocadura. El tipo de agua en ambos trabajos fue bicarbonatada, con mayor tendencia a cálcica y/o magnésica en la serranía y a sódica en la llanura. El promedio de CE, 680 $\mu S/cm^{-1}$, también fue similar al detectado por Cortelezzi A., 2012 que fue de 754 $\mu S/cm^{-1}$.
El pH osciló entre 7,7 y 8,5, en un mayor rango al determinado por Rodríguez et al, 2016 que se encontró entre 7,1 y 7,9.
El OD tuvo un promedio en su porcentaje de saturación de 84%, similar al determinado por Mazzucchelli M.G., 2016 para la cuenca del arroyo Napaleofú que fue de 87% y al determinado anteriormente para el arroyo Chapaleofú Grande y el Chapaleofú propiamente dicho por Cortelezzi A., 2012 que fue de 93%.
En cuanto a la medición de caudal se obtuvo en la zona de llanura un caudal máximo de 1,73 m^3/seg, el cual es bastante superior al obtenido por Boguetti L., 2015 en el sector de llanura para la cuenca del arroyo Langueyú que fue de 1,05 m^3/seg para la misma estación del año en 2012. Esto se explica, más alla de eventos climáticos puntuales, por la mayor superficie de la cuenca del arroyo Chapaleofú.

CONCLUSIONES

Los aspectos esenciales del diseño de la red monitora de recursos hídricos subterráneos incluyeron, al igual que en trabajos antecedentes, el uso de herramientas de georreferenciación, el uso de sistemas de información geográfica para superposición de variables, y la evaluación estadística de criterios utilizados, con el fin de cumplir los objetivos de la red.
Este trabajo permitió conocer las características básicas del recurso hídrico superficial en la cuenca del arroyo Chapaleofú. Los resultados constituyen información útil para otras investigaciones vinculadas a los usos del suelo, a los servicios ambientales relacionados al agua y a la contaminación del sistema debido a actividades antrópicas. Además, la información generada es básica y fundamental para la toma de decisiones en pos de la protección del recurso y su gestión integrada.

El estudio realizado puede considerarse preliminar, ya que es necesario realizar nuevas campañas de muestreo en la red monitora que permitan identificar una evolución temporal de los parámetros fisicoquímicos en distintas estaciones climáticas y al menos en el transcurso de un año. Además se considera necesario ampliar la investigación e incorporar otros parámetros de calidad del agua superficial, como el contenido de nutrientes.
No se encontró relación estadísticamente significativa entre las variaciones puntuales de la concentración de nitratos y los diferentes usos de suelos.
El arroyo Chapaleofú, al igual que otros arroyos rurales del partido, no mostró perturbaciones que presenten un cambio en la calidad del agua en los sitios de muestreo. De todas formas, se constató un importante aumento en la concentración de nitratos con respecto a un trabajo realizado en el mismo arroyo en el año 2012, esto puede deberse a la aplicación de una mayor cantidad de fertilizantes en la actualidad.
Es imprescindible que el productor agropecuario y los actores involucrados en la actividad rural tomen conocimiento y conciencia sobre el uso y manejo integral del recurso hídrico dentro de la actividad productiva; esto involucra no sólo la forma como se efectúa la apropiación del agua, sino también las medidas de protección al recurso hídrico evitando la disposición inadecuada de cargas contaminantes.

REFERENCIAS

APHA. Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A. E. and Franson, M. A. H. (EDS). Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater (21st Edition). *APHA*: Washington, D.C. (2005).

Appelo, C. A. J. and Postma, D. Geochemistry, groundwater and pollution. Ed. A. A. Balkema, 649 pp. (1993).

Banda Noriega, R.B., Ruiz de Galarreta, A.V., Barranquero, R. S., Saraceno, D., Irastorza, M.T., Cifuentes, M., Cisneros Basualdo, N.E., Díaz, A., Donalisio, R., Galecio, M.F., Landa, R., Quiroga, M., Rodríguez, C.I, Sosa, B., Tabera, A. Evaluación de agroquímicos en arroyos y agua subterránea del partido de Tandil considerando características hidrogeológicas y uso del suelo (2018).

Bogetti, L. Diagnóstico ambiental de la cuenca superior del arroyo Langueyú. *Tesis de Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental*. Facultad de Ciencias Humanas, Tandil, Argentina (2015).

Castany, G. Prospección y explotación de las aguas subterráneas. *Ed. Omega*. Barcelona. ISBN 84-282-0376-8 (1975).

Cortelezzi, A. Determinación del estado ecológico de los sistemas loticos del partido de Tandil: Resultados preliminares de la calidad del agua. *Manuscrito no publicado* (2012).

Custodio, E., Garrido, A., Coleto, C., and Salmoral, G. The challenges of agricultural diffuse pollution. In L. De Stefano & R. Llamas (Eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle*? (pp. 153–164). Madrid, España (2012).

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. El estado mundial de la agricultura y alimentación. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*. ISSN 0251-1371. Roma, Italia (2018).

Ferrier, R.C., D'Arcy, B.J., MacDonald, J., y Aitken, M. Diffuse pollution - what is the nature of the problem? *Water and Environment Journal*, 19(4), 361–366. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.tb00574.x. (2005).

González N. Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires. Cap. XXII, pp. 359-374; En: *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata (2005).

Goudie, A. The human impact on the natural environment: past, present, and future. Seventh edition. *A John Wiley & Sons*, Ltd., Publication. p. 424 (2013).

Krueger, T., Maynard, C., Carr, G., Bruns, A., Mueller, E. N. and Lane, S. A transdisciplinary account of water research. *WIREs Water* 2016, 3, 369-389. doi: 10.1002/wat2.1132. (2016).

Mazzucchelli, M. G. Diagnóstico físico químico y microbiológico del agua superficial del área serrana del arroyo Napaleofú. Tandil, Provincia de Buenos Aires. *Tesis de Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. (2016).

Organización mundial de la salud. Guías para la calidad del agua potable. *Primer apéndice a la tercera edición.* Volumen 1. Recomendaciones (2oo6).

Rodriguez, C.I., Gaspari, F., Ruiz de Galarreta, A.V., Kruse, E., Quiroga, M.A and Landa, R. Caracterización hidrológica de la cuenca alta del arroyo Napaleofú. *Libro de resúmenes I Jornadas Internacionales y III Nacionales de Ambiente*, Tandil, Argentina. (2016).

Ruiz de Galarreta, V. A., y Banda Noriega, R. Geohidrología y evaluación de nitratos del partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. En: *IV Congreso Argentino de Hidrogeología. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea.* UNCR. Córdoba, octubre de 2005; pp.: 99-108 (2005).

Ruiz de Galarreta, V. A., Barranquero, R., Varni, M., y Rodriguez, C.I. Geología e hidrolitología de la cuenca del Arroyo Langueyú, Provincia de Buenos Aires (Argentina). UNICEN. CINEA. IHLLA. (2011).

Ruiz de Galarreta, V. A., Banda Noriega, R. B., Najle, R., Rodríguez, C. I., Barranquero, R. S., Díaz, A. A., Miguel, R. E., Pereyra, M., and Priano, M. E. Análisis de la calidad del agua del arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires. Volumen 1 N° 1, año 2013. ISSN: 2347-0941. *Revista estudios ambientales*. Publicación digital del CINEA (2013).

Shiferaw, B., Bank, W., Freeman, A., Bank, W., y Swinton, S. Natural resource management in agriculture: methods for assessing economic and environmental impacts. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Natural_Resources_Management_in_Agricult.html?id=CqVoz7LUHfIC&redir_esc=y (2005).

Viglizzo, E.F. Desafíos y oportunidades de la expansión agrícola en Argentina. En: Producción Agropecuaria y Medio Ambiente. *Propuestas Compartidas para su Sustentabilidad* (Martínez Ortiz, U., editor), Fundación Vida Silvestre Argentina, INTA, World Wildlife Foundation, Buenos Aires (Argentina), 12-42 (2007).

Vigglizo, E.F. Agro y ambiente: una agenda compartida para el desarrollo sustentable. Resumen ejecutivo. Solbrig, O.T (coord.). *Foro de la cadena agroindustrial Argentina*. Buenos Aires (Argentina) (2008).

Xu, L., Gober, P., Wheater, HS and Kajikawa, Y. Reframing socio-hydrological research to include a social science perspective. *Journal of hydrology*, 563, 76-83. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.061 (2018).

PATRÓN DE EXACTITUD CARTOGRÁFICA (PEC) DEL MODELO DIGITAL DE TERRENO DE LA BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL CONTINUA DEL ESTADO DE AMAPÁ: ESTUDIO DE CASO DE LA CIUDAD DE MACAPÁ, BRASIL

dos Santos Filho H.[a,b], Cornero C.[b] y Pereira A.[b]

[a]*Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Federal del Amapá, UNIFAP, BRASIL*
[b]*Área de Geodinámica y Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, CONICET, ARGENTINA*

e-mail:herondino7@yahoo.com.br

RESUMEN

El Patrón de Exactitud Cartográfica (PEC) es una norma brasileña utilizada para estimar la exactitud posicional de los productos cartográficos en su grado de precisión espacial de referencia. La Base Cartográfica Digital y Continua de Amapá (BCDCA) tiene una gran cantidad de información espacial disponible de forma libre para el estudio del territorio comprendido dentro del estado de Amapá. Entre estos productos, el Modelo Digital del Terreno (MDT) tiene una multitud de aplicaciones: mapeo geológico, visualización en 3D, análisis de cuencas hidrográficas, aplicaciones forestales, conservación de recursos naturales, análisis de riesgos ambientales, planificación de infraestructura y otros. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los datos altimétricos proporcionados por el MDT de la BCDCA a través de más de 2.000 puntos GNSS medidos en campo en la ciudad de Macapá. Para las curvas de nivel, los resultados mostraron la clase A para la escala 1: 10.000, a una equidistancia de 5 m.

Palabras clave: MDT, Base Cartográfica, Evaluación, PEC.

INTRODUCCIÓN

El uso de modelos de elevación digital elaborados a partir de datos SAR (*Synthetic Aperture Radar*) se ha difundido y utilizado en variados campos de la ciencia, y muchos de ellos están disponibles en forma libre. Como ejemplos podemos mencionar los modelos globales de las misiones SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) compartidos por la Agencia Espacial de los Estados Unidos - NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o los disponibles por el INPE (siglas en portugués del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil) por medio de la plataforma TOPODA y también los proporcionados por el CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales del Argentina) lo modelo MDE-Ar.

Por otro lado un proyecto del gobierno del estado del Amapá en asociación con la Dirección de Servicios Geográficos del Ejército brasileño (DSG), ha producido un gran volumen de información a través de sensores SAR. Este proyecto fue denominado de Base Cartográfica Digital Continua del Amapá (BCDCA). El Estado del Amapá tiene poca

información sobre sus propios límites territoriales, es decir, hay un “vacío de información” en especial sobre sus áreas ambientales protegidas y destinadas a la protección ambiental (Santos Filho, H. y Oliveira, M. J., 2019).
Para llevar a cabo el trabajo, el DSG utilizó la tecnología de la compañía brasileña BRADAR y realizó vuelos aéreos con sensores radar a bordo en banda X y P, desde octubre del 2014. Su cierre fue en diciembre de 2017 (Geoportal do Exército Brasileiro, 2020), donde se entregó entre otros, los productos: modelos digitales de superficie (MDS) generados por la banda X y los modelos digitales de terreno (MDT) generados por la banda P.
En este trabajo, se evalúa la calidad del MDT en la banda P. Para Menezes, P. R. y Almeida, T., 2012 “los modelos topográficos tradicionales, generalmente de alto costo” y equipos más especializados, “han dado paso a métodos más automatizados como el sistema de posicionamiento global (GPS) y la interferometria de radar de apertura sintética. - InSAR".
A partir de estas señales pueden ser generadas imágenes de amplitud y fase, guardadas como imágenes complejas (*single look complex* – SLC). A partir de estas imágenes, se obtiene el par interferométrico, y luego, con la técnica InSAR se genera una nueva imagen, donde la fase de cada pixeles es formada por la diferencia de fase entre los pixeles de las dos imágenes. Con el conocimiento de la geometría de adquisición de de las imágenes y de técnicas InSAR es posible convertir la diferencia de fase en altitud (Hanssen, R. F., 2002).
Vale la pena señalar la excelente respuesta de los productos de radar en la región de la Amazonia, especialmente en regiones forestales densas y cubiertas de nubes, como ocurre en el Estado de Amapá, ya que proporcionan datos complementarios a las imágenes satelitales ópticas que tienen mayores limitaciones en dichas áreas. Por lo tanto, una vez que los datos MDT bajo análisis en el presente estudio hayan sido evaluados y validados, las regiones podrían beneficiarse de esta tecnología con un cierto grado de confiabilidad.
El objetivo de este trabajo es evaluar los datos altimétricos generados a partir del modelo digital del terreno (MDT) de la Base Cartográfica Digital Continua de Amapá (BCDCA), y su uso en distintas escalas de trabajo en el perímetro urbano de la ciudad de Macapá, la capital del estado del Amapá.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la evaluación del Modelo Digital de Terreno de la Base Cartográfica Digital Continua de Amapá (BCDCA) siguieron los procedimientos metodológicos a continuación: Delimitación del área de estudio, adquisición del MDT, procesamiento de imagen y generación del modelo numérico de terreno (MNT) y evaluación de los insumos generados.

Delimitación del área de estudio

El perímetro urbano de la ciudad de *Macapá*, capital del estado de Amapá, fue el área del objeto de estudio de este trabajo como presenta la Fig.1.
Es importante resaltar las características fisiográficas de esta capital, ubicada a orillas del río Amazonas, donde la baja altitud es presentada por sus humedales, nombrados por sus ciudadanos como "*Resacas*" y de alto valor ambiental.

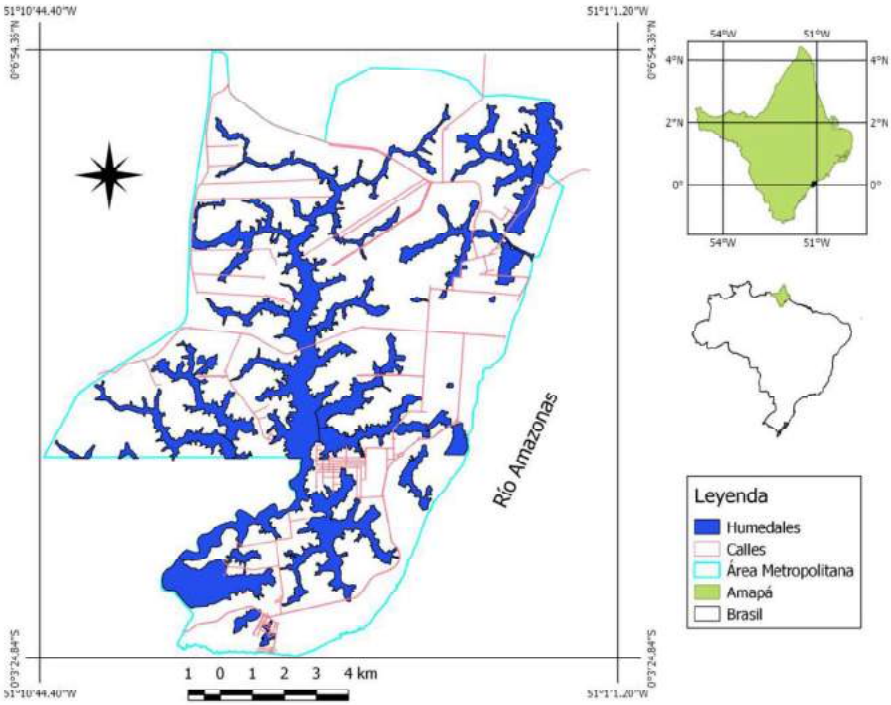


Figura 1. Ubicación del área de estudio – Macapá/AMAPÁ

Adquisición del MDT

El producto representativo del Modelo Digital de Terreno (MDT) fue obtenida por distribución libre realizada por la Secretaría de Medio Ambiente - SEMA / AP. Los productos se adquirieron de acuerdo con las especificaciones dentro del sistema de proyección UTM / SIRGAS 2000, en el formato TIF.

Procesamiento de la imagen y el modelo numérico

Cuatro imágenes MDT en una escala de 1:25.000 y de dimensione 2,5 m del pixel de la base cartográfica fueron importadas al QGIS, para luego generar el mosaico mediante la técnica del vecino más cercano, lo que permitió su visualización y tomada de las cotas altimétricas para creación del Modelo Numérico de Terreno (MNT).

Evaluación de la cartografía

Para el estudio de la confiabilidad del producto de la base cartográfica, el Modelo Numérico del Terreno, fue sometidos a la comparación con 2.172 puntos medidos en campo (ver Fig. 2) obtenidos por la empresa topográfica Constructora Amacol Ltda, y derivados / calculados de la Red Brasileña de Monitoreo Continuo - RBMC de los sistemas Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS) generando modelos de regresión lineal simple y otros parámetros estadísticos.

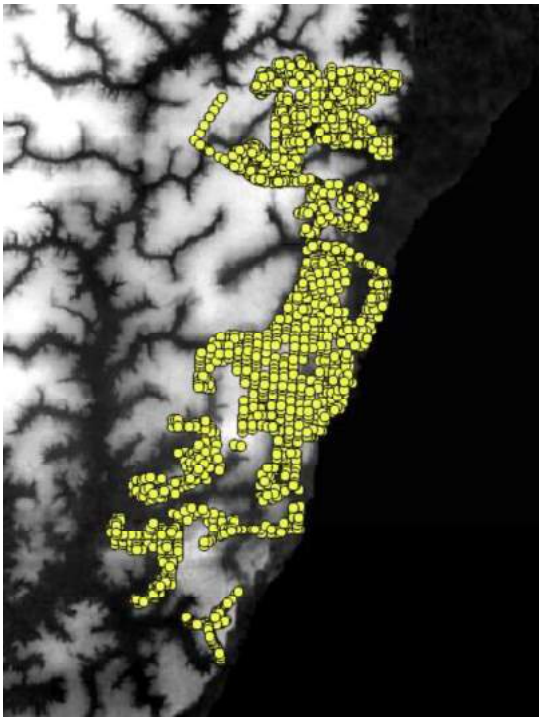


Figura 2. Puntos GNSS obtenidos

Se realizó la evaluación del con un análisis estadístico a través de los siguientes parámetros: Coeficiente de Pearson [R], Coeficiente de Determinación [R^2], Error medio (*Mean Error*), error medio cuadrático (EMQ), error estándar (EP) y el Patrón de Exactitud Cartográfica - PEC.

Patrón de Exactitud Cartográfica (PEC)

El Patrón de Exactitud Cartográfica fue instituido por el Decreto 89.817 del 20 de junio de 1984 del gobierno del Brasil (Brasil, 1984). De acuerdo con DSG, 2016 esta ley, el Patrón de Exactitud Cartográfica es un "indicador de dispersión estadística", relativo al 90% de probabilidad, que define la precisión de los trabajos cartográficos, también referido por Santos Filho, H. y Oliveira, M. J., 2019; Sampaio, T. V. M., 2018 y Ariza-López, F. J. et al., 2017. En la ley Brasil, 1984 la probabilidad del 90% corresponde a 1,6449 veces el error estándar (EP), ver Ec. (1):

$$PEC_{ENCONTRADO} = 1{,}6449 * EP \quad (1)$$

Los valores deben compararse con los datos de las Tablas 1 o 2 según sea el caso, teniendo en cuenta que el PEC encontrado debe ser menor que el PEC tabulado, es decir, de acuerdo con la Ec. (2):

$$PEC_{ENCONTRADO} < PEC_{TABULADO} \quad (2)$$

La Tabla I muestra las especificaciones técnicas sobre los datos altimétricos que discriminan la equidistancia entre las curvas de nivel y los valores respectivos ya calculados con sus clases correspondientes, de acuerdo con el Decreto 89.817.

Tabla I. Patrón de Exactitud Cartográfica de altimetría (curvas de nivel) de los Productos Cartográficos Digitales Fuente: DSG, 2016.

PEC		**A**	**B**	**C**	
PEC-PCD		**A**	**B**	**C**	**D**
1:1.000	PEC (m)	0,50	0,60	0,75	1,00
(Eqd=1 m)	EP (m)	0,33	0,40	0,50	0,60
1:2.000	PEC (m)	0,50	0,60	0,75	1,00
(Eqd=1 m)	EP (m)	0,33	0,40	0,50	0,60
1:5.000	PEC (m)	1,00	1,20	1,50	2,00
(Eqd=2 m)	EP (m)	0,67	0,80	1,00	1,20
1:10.000	PEC (m)	2,50	3,00	3,75	5,00
(Eqd=5 m)	EP (m)	1,67	2,00	2,50	3,00
1:25.000	PEC (m)	5,00	6,00	7,50	10,00
(Eqd=10 m)	EP (m)	3,33	4,00	5,00	6,00
1:50.000	PEC (m)	10,00	12,00	15,00	20,00
(Eqd=20 m)	EP (m)	6,67	8,00	10,00	12,00
1:100.000	PEC (m)	25,00	30,00	37,50	50,00
(Eqd=50 m)	EP (m)	16,67	20,00	25,00	30,00
1:250.000	PEC (m)	50,00	60,00	75,00	100,00
(Eqd=100m)	EP (m)	33,33	40,00	50,00	60,00

La Tabla II se refiere a los valores del Estándar de Precisión Cartográfica para productos cartográficos digitales (PEC-PCD), tomados de la Especificación Técnica para Productos de Conjuntos de Datos Geoespaciales (ET-PCDG) (DSG, 2016). Estos valores se proponen para productos digitales producidos después de la publicación de ET-PCDG y complementan los establecidos, para productos impresos, en el Decreto nº 89.817, de 20 de junio de 1984 (Brasil, 1984).

Tabla II. Patrón de Exactitud Cartográfica altimétrica de los Puntos Cotados y de los MDT, MDE y MDS para la producción de productos cartográficos digitales Fuente: DSG, 2016

PEC-PCD		**A**	**B**	**C**	**D**
1:1.000	PEC (m)	0,27	0,50	0,60	0,75
(Eqd=1 m)	EP (m)	0,17	0,33	0,40	0,50
1:2.000	PEC (m)	0,27	0,50	0,60	0,75
(Eqd=1 m)	EP (m)	0,17	0,33	0,40	0,50
1:5.000	PEC (m)	0,54	1,00	1,20	1,50
(Eqd=2 m)	EP (m)	0,34	0,66	0,80	1,00
1:10.000	PEC (m)	1,35	2,50	3,00	3,75
(Eqd=5 m)	EP (m)	0,84	1,67	2,00	2,50
1:25.000	PEC (m)	2,70	5,00	6,00	7,50
(Eqd=10 m)	EP (m)	1,67	3,33	4,00	5,00
1:50.000	PEC (m)	5,50	10,00	12,00	15,00
(Eqd=20 m)	EP (m)	3,33	6,66	8,00	10,00
1:100.000	PEC (m)	13,70	25,00	30,00	37,50
(Eqd=50 m)	EP (m)	8,33	16,66	20,00	25,00

1:250.000	PEC (m)	27,00	50,00	60,00	75,00
(Eqd=100m)	EP (m)	16,67	33,33	40,00	50,00

Los valores esperados para la clase "A" (PEC-PCD) se definieron en base a las adaptaciones de los estudios realizados por Merchant (1982) y ASPRS (1989), en los que el PEC-PCD = 0.27 * Equidistancia del producto cartográfico y también su error estándar EP = 1/6 * Equidistancia del producto cartográfico. Las clases "B", "C" y "D" del PEC-PCD corresponden, en orden, a las clases "A", "B", "C" del PEC altimétrico previsto en el Decreto 89.817, del 20 de junio de 1984 (DSG, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Fig. 3 se muestra el gráfico de la correlación entre los puntos de la muestra, de las cotas medidas (GNSS) y las estimadas por la base cartográfica (BCDCA), en la que ya se verifican números muy próximos a la altimetría comparada en el 90,6%.

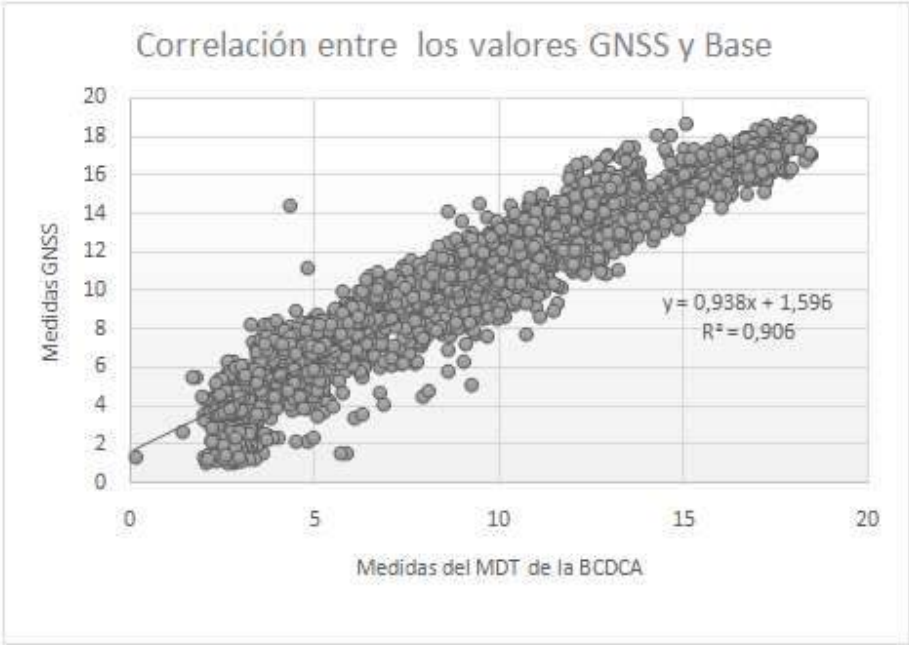


Figura 3. Correlación entre los puntos GNSS y valores de la Base Cartográfica

Los valores de la Base Cartográfica Digital Continua de Amapá - BCDCA cuando comparados con los datos GNSS presentaron resultados de correlación de Pearson alcanzando valores de 0,951998 y un coeficiente de determinación de 0,9063, mostrando una alta correlación, como se presenta en la Tabla III.

Tabla III. Parámetros comparativos entre los datos

Parámetros	Valores
Error Medio	0,0002
EQM	1,9710
Error Medio Porcentual	6,5749

Coeficiente de Pearson	0,9519
Coeficiente de Determinación	0,9063
Desvío estándar (EP)	1,4039

En la evaluación del PEC (2,30) encontrado, la clase de elevación altimétrica con referencia a las curvas de nivel se encuentra en la clase A, en cinco metros de equidistancia, escala 1:10.000, como muestra la Tabla VI. Esto presenta una gran precisión para las obras que se desarrollen en grandes escalas y que envuelven el ámbito urbano.

Tabla IV. Clase encontrada en cada modelo de elevación para altimetría (curvas de nivel)

	BCDCA
	PEC = 2,3093; EP = 1,403937
Clase	*1:10.000 (Eqd = 5m)*
A	2,50
B	3,00
C	3,75

El modelo BCDCA presenta para la altimetría de los puntos GNSS y del modelo MDT para los productos cartográficos digitales Clase A en la escala 1: 25.000 y Clase B en la escala 1: 10.000, como se muestra en la Tabla V.

Tabla V. PEC encontrado para los modelos altimétricos MDT

	BCDCA	
	PEC=2,3093; EP=1,403937	
Clase	*Eqd = 5m (1:10.000)*	*Eqd = 10m (1:25.000)*
A	1,35	2,70
B	2,50	5,00
C	3,00	6,00
D	3,75	7,50

CONCLUSIONES

El Modelo Digital del Terreno de la Base Cartográfica Digital Continua de Amapá, fue evaluado en este trabajo como muy confiable, pudiendo generar mapas topográficos (altimetría / curvas de nivel) a gran escala, como aquellos compatibles con la representación del espacio geográfico de la ciudad. Los datos encontrados, en comparación con los definidos en el Patrón de Exactitud Cartográfica (PEC), demuestran excelentes resultados para el gráfico topográfico de las curvas de nivel del perímetro urbano de

Macapá en la escala de 1: 10.000 (equidistancia de 5 m), como en la clase A. En general esta escala es utilizada en planos y cartas catastrales.

Para la altimetría de los puntos enumerados en el modelo MDT, los productos cartográficos digitales alcanzan la clase A en la escala 1: 25.000 y la clase B en la escala 1: 10.000. A ejemplo, esta escala presenta la exactitud de la red de drenaje o humedales producidos a partir de esta información.

Por lo tanto, esto muestra una gran precisión para que las obras se desarrollen en grandes escalas que involucren el perímetro urbano de la ciudad, proporcionando mayor exactitud para el desarrollo de estudios ambientales y que requieren de datos topográficos confiables.

REFERENCIAS

Ariza-López, F. J., Xavier, E., Chicaiza, E., Buenaño, X. Métodos de evaluación de la calidad posicional en Hispanoamérica: análisis de la situación. *Revista Cartográfica* 94, 73-74, (2017).

Brasil. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para assuntos Jurídicos. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, ano 96, 1984.

DSG – Diretoria de Serviço Geográfico. *Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais da Força Terrestre – ET-ADGV* Defesa FT, 2ª versão. Brasília: DSG, 2016.

Geoportal do Exército Brasileiro. Diretoria de Serviço Geográfico. Estado do Amapá. 2017. Disponível em: < https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/MjaG93KcunQI/content/id/8484513 >. Acceso en: 03 abril 2020.

Hanssen, R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. (Remote Sensing and Digital Image Processing). New York: *Kluwer Academic Publishers*, v.2. 2002.

Menezes, P. R.; Almeida, T.(Org.). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: *Universidade Nacional de Brasília*, 266 (2012).

Sampaio, T. V. M. Cartografia geral, digital e temática. Curitiba: *Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas*, 83-84, (2018).

Santos Filho, H.; Oliveira, M. J. Avaliação do Modelo Digital de Terreno (MDT) do Projeto Base Cartográfica Digital Contínua Do Amapá: Estudo de Caso do Perímetro Urbano de Macapá. In: Atena Editora (Paraná) (Org.). Processamento, análise e disponibilização de informação geográfica. Ponta Grossa: *Atena Editora*, 70-81, (2019).

LA UTILIZACIÓN DE SIG LIBRES, COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL RÍO QUINTO EN EL TRAMO DEL MUNICIPIO DE VILLA MERCEDES, SAN LUIS, ARGENTINA

Dueñas D. A [a] y Sosa G. del R [a ,b]

[a]*Departamento de Geología, FCFM yN, Universidad Nacional de San Luis, ARGENTINA*
[b]*T. S.G.A, Esc. de Ing y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Villa Mercedes, ARGENTINA*

e-mail: jobs.dduenas@gmail.com ; sosagr@unsl.edu.ar

RESUMEN

La zona de estudio se ubica en el municipio de Villa Mercedes, situado en el sector centro-oriental de la provincia de San Luis. La misma se encuentra comprendida entre los paralelos 33°35'21,28" y 33°45'30,90"Sur y los meridianos de 65°36'2,73" y 65°21'34,80"Oeste. El objetivo fue realizar una caracterización morfométrica y granulométrica del sistema fluvial del río Quinto, en el tramo que recorre el municipio centrada en su morfodinámica actual, utilizando el Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto Quantum GIS (Qgis) como también información de los modelos digitales de elevación (MDE) y capas vectoriales tomadas de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional como herramienta para caracterizar y clasificar los sistemas fluviales, con controles de campo. La ubicación espacial de cada elemento fue definida bajo un sistema de referencia que incluyó coordenadas planas encuadradas en el marco geodésico POSGAR 07 donde las distancias se miden fácilmente y para áreas pequeñas conservan la forma de los accidentes geográficos sin deformación significativa.
El producto gráfico resultante sintetizó por un lado la situación general del área de trabajo integrado a las características geomorfológicas (parámetros morfométricos) y sedimentológicos (variación textural de sedimentos de fondo de canal). Los resultados obtenidos de la información extraída del MDE son datos altitudinales y longitudinales complementados con datos sedimentológicos de muestras de fondo de canal, procesadas en laboratorio y con el software GRADISTAT 4.0. La información obtenida se sintetizó en tablas para su posterior interpretación. La utilización de los SIG como Qgis, son valiosos para generar y administrar información extraída de los MDE. Permiten reconocer datos de interés para comprender como este escenario influye de forma directa en las condiciones hidrodinámicas vinculadas al transporte y sedimentación de la carga de fondo del río Quinto.

Palabras Clave: SIG, Rio Quinto, Sedimentos, Morfodinámica.

SUMMARY

The study area is located in the municipality of Villa Mercedes, located in the central-eastern sector of the province of San Luis. It is found between the parallels 33° 35' 21.28" and 33° 45'30.90" South and the meridians of 65 ° 36'2.73 "and 65 ° 21'34.80" West. The objective was to carry out a morphometric and granulometric characterization of the river system of the Quinto river, in the section that runs through the municipality focused on its current morphodynamics, using the free and open source Geographic Information System Quantum GIS (Qgis) as well as information from the digital elevation models (DEM) and vector layers taken from the National Geographic Institute database as a tool to characterize and classify river systems, with field controls. The spatial location of each element was defined under a reference system that included plane coordinates framed in the POSGAR 07 geodetic frame where distances are easily measured and for small areas they preserve the shape of geographical features without significant deformation.

The resulting graphic product synthesized, on the one hand, the general situation of the work area integrated with the geomorphological (morphometric parameters) and sedimentological characteristics (textural variation of channel bottom sediments). The results obtained from the information extracted from the DEM are altitudinal and longitudinal data complemented with sedimentological data from channel bottom samples, processed in the laboratory and with the GRADISTAT 4.0 software. The information obtained was synthesized in tables for later interpretation. The use of GIS as Qgis, are valuable to generate and manage information extracted from the DEM. They allow us to recognize data of interest to understand how this scenario directly influences the hydrodynamic conditions related to the transport and sedimentation of the bottom load of the Quinto river.

Key Words: GIS, Quinto River, Sediments, Morphodynamics.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica en la provincia de San Luis, en su sector centro oriental, se encuentra comprendida entre los paralelos 33°35'21,28" y 33°45'30,90"Sur y los meridianos de 65°36'2,73" y 65°21'34,80"Oeste “ver Fig. 1”, contiene al municipio de Villa Mercedes, ocupando una superficie de 424 km^2, aunque se considera aquí solo la porción asociada directamente al río Quinto.

Villa Mercedes es la segunda ciudad en cantidad de habitantes y recursos económicos de la provincia. La evolución demográfica indica un crecimiento de población estable del 214% para el período 1960-2010, alcanzando los 111.391 habitantes (INDEC 2010). Su crecimiento urbano ha estado asociado principalmente a lo largo de la margen este del río Quinto, así la ciudad presenta una fuerte expansión, a manera de faja norte- sur limitada por la ruta nacional Nº7 y el río Quinto, sobre sedimentos aluvio-eólicos los que fueron modificando las unidades geomorfológicas. En la última década empezó a expandirse la urbanización a la margen oeste del río acompañada por obras de infraestructura sobre el cauce para favorecer su conexión y funcionalidad.

El río Quinto, principal curso de agua de la provincia, tiene sus nacientes al sureste de las Sierras de San Luis y presenta una cuenca imbrífera con orientación oeste-noroeste a este-sudeste y un área de 34.360 km^2 que abarca parte de las provincias de San Luis, Córdoba y Santa Fe. El municipio de Villa Mercedes la intercepta en el tramo medio alto de la misma.

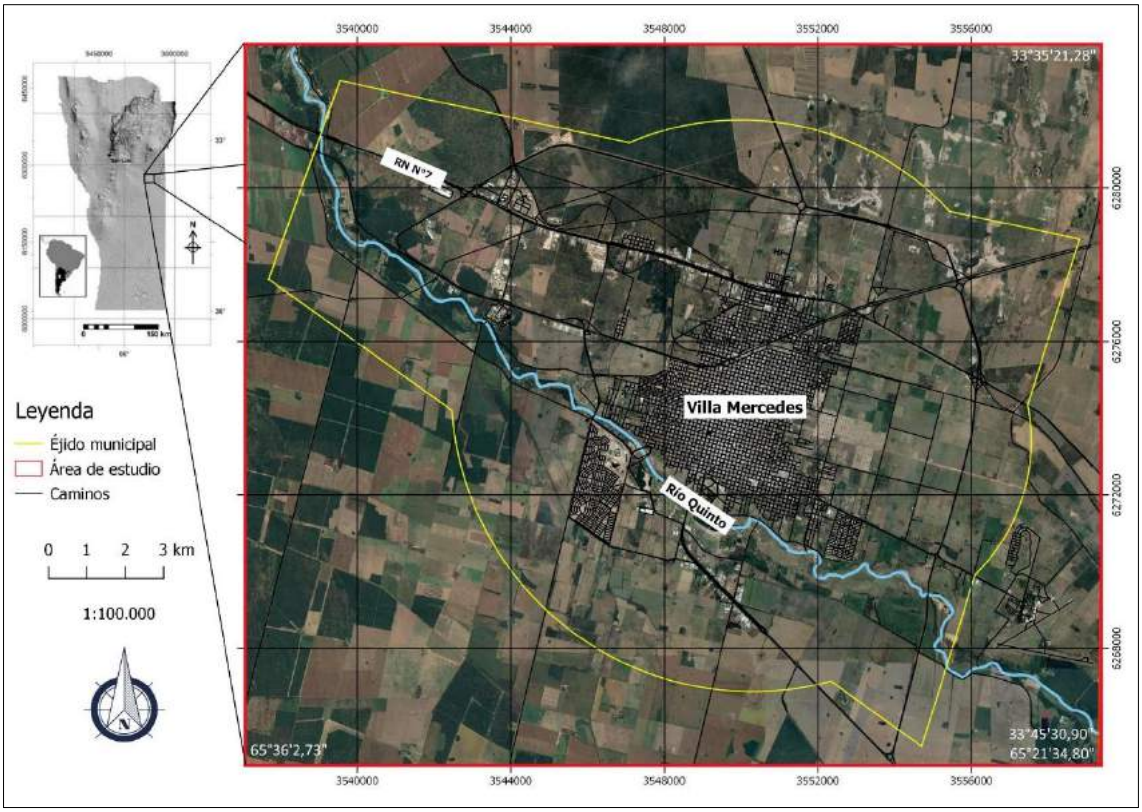


Figura 1: Mapa de ubicación y vías de acceso sobre una imagen satelital (Google Earth ™ 2016) proyectada a POSGAR 07 (Faja 3).

GEOLOGÍA

Regionalmente el área de estudio se ubica en el límite de las provincias geológicas Llanura Chacopampeana y el extremo sur de las Sierras Pampeanas Orientales (Ramos, 1999). Localmente, el basamento cristalino conformado por rocas ígneas y metamórficas no aflora, la superficie presenta mayoritariamente depósitos sedimentarios asignados al periodo Cuaternario y en menor porcentaje al Neógeno. La mayoría de estos, pertenecen a la denominada Planicie Loessoide y a la Planicie Medanosa (González Díaz, 1981), ambos representados por materiales de origen eólico y aluvio-eólico. El sitio está caracterizado por un relieve plano a suavemente ondulado, con paleodunas longitudinales orientadas en dirección nornoroeste-sursureste (Ramonell et al. 1992). Las mismas fueron reactivadas durante principios del siglo XX producto de la acción antrópica relacionada a cambios en el uso del suelo, sumado a factores naturales (Díaz Balocchi, 2016).

OBJETIVO

Realizar una caracterización morfométrica y granulométrica del sistema fluvial del río Quinto en el tramo que recorre el municipio, centrada en su morfodinámica actual, como parte de un estudio, utilizando un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto como Quantum GIS (QGIS) y SAGA GIS, e información de los modelos digitales de elevación (MDE) y capas vectoriales tomadas de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con controles de campo, como herramientas para caracterizar y clasificar los sistemas fluviales.

METODOLOGÍA:

Las actividades se organizaron en dos líneas de trabajo que posteriormente se unificaron. La primera, centrada en la aplicación en el área de estudio del software QGIS, SAGA GIS, el programa Google Earth y datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La otra línea, centrada en la caracterización hidrometeorológica, datos de campo, muestreo de sedimentos de fondo de canal, y tareas de laboratorio.

La generación de la cartografía de base se realizó mediante el manejo del SIG QGIS y sus complementos, utilizando entre otros el método de digitalización en pantalla en un entorno vectorial, como también información de los modelos digitales de elevación (MDE-Ar v2.0) de ~30 metros de resolución espacial y capas vectoriales tomadas de la base de datos del IGN. La ubicación espacial de cada elemento fue definida bajo un sistema de referencia que incluyó tanto coordenadas geográficas como planas, esta última encuadrada en el marco de referencia geodésico POSGAR 07 (código EPSG: 5345) la cual permite medir las distancias fácilmente y para áreas pequeñas se conserva la forma de los accidentes geográficos sin deformación significativa. El producto gráfico resultante sintetiza por un lado la situación general del área de trabajo integrado a las características geomorfológicas (parámetros morfométricos) y granulométricos (variación textural de sedimentos de fondo de canal).

Geoprocesamientos realizados para la obtención de la información: para exponer la situación general del área se utilizó el MDE junto con una capa en formato *shapefile* (SHP) del área de estudio. Su presentación fue mejorada por medio de sombreado y adición de color al relieve en función de la altura, otorgando de este modo un aspecto tridimensional. Además, se utilizaron imágenes satelitales del programa Google Earth.

La capa de drenaje se realizó en base a un modelado hidrológico utilizando el software SAGA GIS en base al modelo digital de elevación corregido hidrológicamente y luego fue considerado el flujo de agua acumulado en un punto sumidero del cual se descartaron los afluentes menores. Se obtuvo una cobertura vectorial de líneas que luego fue exportada para ser editada en QGIS y que representa el canal principal de sistema río Quinto dentro del ejido del municipio de Villa Mercedes.

Finalmente, se generaron perfiles altimétricos longitudinales y secciones transversales a la faja fluvial para obtener la pendiente y los parámetros morfométricos del canal del río utilizando el complemento *Terrain profile* de QGIS, que facilitó la interpretación morfométrica en los distintos sectores.

Por otro lado, para efectuar la caracterización hidrometeorológica, se realizó una recopilación y procesamiento de registros hidrológicos y meteorológicos. Se consideraron los datos medidos en las estaciones de aforo sobre el río Quinto de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación (SRHN) en los diques Paso de las Carretas y Vulpiani. Los registros meteorológicos, fueron tomados del catálogo de datos abiertos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de los informes de la Red de Estaciones Meteorológicas de la provincia de San Luis (REM) y de publicaciones científicas.

Se realizó un muestreo de sedimentos de fondo de canal, descripción y ubicación espacial de la relación ancho versus profundidad del canal (A/P), procesos de erosión vertical y lateral, desbordes y sedimentación, como también la descripción macroscópica de los perfiles sedimentarios a lo largo de cada tramo dispuesto en la ribera del río Quinto en su recorrido a través de Villa Mercedes.

Las tareas de laboratorio consistieron en un análisis granulométrico de las muestras obtenidas en los sitios de interés. Dichas muestras se analizaron mediante tamizado electro-mecánico en seco. Para la clasificación granulométrica se utilizó el software GRADISTAT 4.0 en base a la escala de Udden-Wentworth (1922). La información textural fue clasificada según la propuesta de Folk y Ward (1957) representada en tablas de Excel.

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La provincia de San Luis se halla ubicada en el centro geográfico del país y se encuentra sujeta a factores dinámicos y físicos del clima propios de su continentalidad. En base al sistema de clasificación climática de Thornthwaite (1949), la región posee un clima continental templado semiárido con régimen monzónico de precipitaciones.
El registro pluviométrico de la estación meteorológica Villa Mercedes muestra una precipitación media anual de 574 mm para la serie 2008-2019, los que fueron cotejado con la serie 1903-2019 de FICA-UNSL. El intervalo 2012 al 2017 se caracterizó por el exceso hídrico bien marcado en ambas series (REM y FICA-UNSL) y los años 2014 y 2015 se posicionan como los más húmedos, acumulando 858,4 mm y 1205,2 mm respectivamente.
La temperatura media anual para la estación meteorológica Villa Mercedes para el periodo 2008-2019, es de 16,7°C, en lo que respecta a temperaturas máximas y mínimas se encuentran entre 24,1°C y 8,8°C respectivamente. Las temperaturas extremas durante este intervalo de tiempo fueron de 40,8°C como máxima absoluta y -10,3°C como mínima.

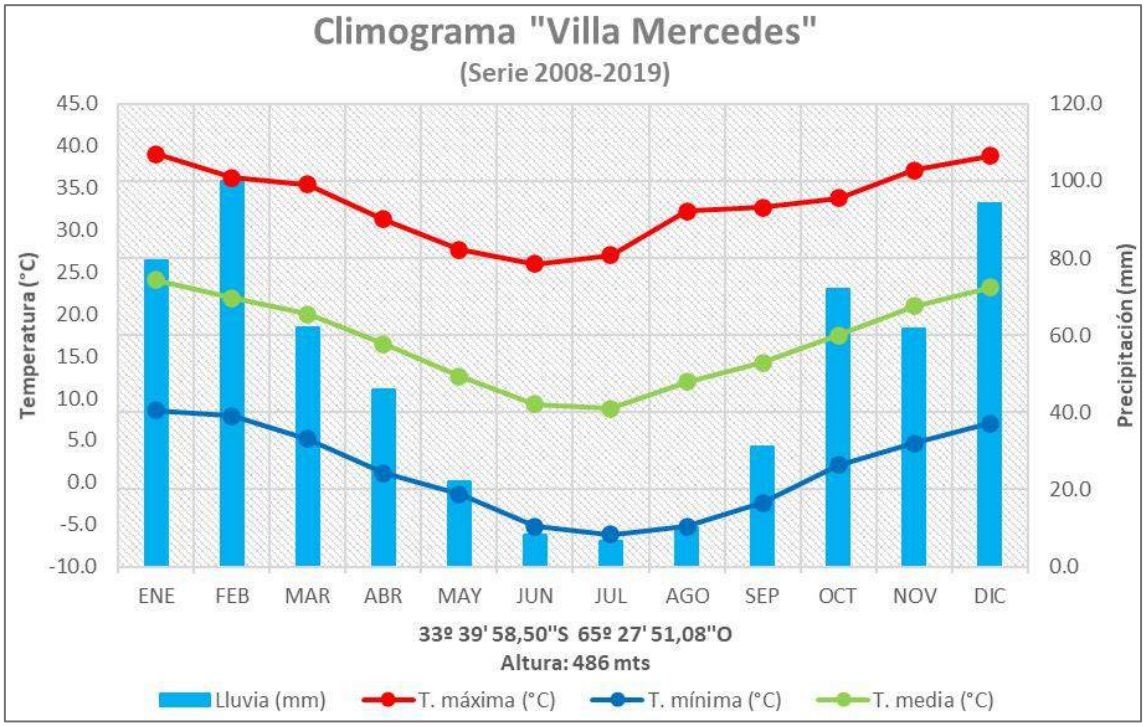


Figura 2: Climograma de la EM Villa Mercedes para la serie 2008-2019 (REM).

RELACIÓN ENTRE EL ANCHO Y LA PROFUNDIDAD DEL CAUCE

La configuración del cauce suele ser la expresión más evidente a los cambios y estos, suelen estar asociados a fluctuaciones en los caudales dominantes y extremos. Los perfiles transversales de un canal o secciones, constituyen una de las variables de ajuste más útiles siendo un buen indicador permitiendo efectuar inferencias sobre las características litológicas de las márgenes y fondo del canal. Magnante (2010) considera que, además, brinda información de manera indirecta del tipo de régimen climático imperante

(desarrollo de la cubierta vegetal) y de las relaciones dinámicas y ambientales sucedidas. Es por esta razón que es frecuentemente utilizada para clasificar canales, tanto en trabajos básicos sobre geomorfología fluvial (Schumm,1977 y 1985) como en aquellos aplicados al manejo de sistemas fluviales (Rosgen, 1994), entre otros.
Para este estudio, la geometría de la sección fue dimensionada a partir de los datos de perfiles transversales calculados sobre los modelos digitales de elevación en el estado de canal lleno o *banckfull channel*, en los sitios de muestreo y los resultados se presentan en la tabla I. y en "ver Fig. 3".

Tabla I: Información morfométrica del canal y granulométrica de los sedimentos de fondo de canal. Referencias: Grava muy fina (GMF), Arena Gruesa (AG), Arena Muy Gruesa (AMG), Arena Gruesa (AG), Grava Media (GM).

Muestra	Ancho (m)	Profundidad (m)	A/P	Clasificación	Pendiente (grados)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Tipo
1	315	11.32	27.83	Moderado a Alto	4.8	39.8	60.1	0.1	GMF
2	321	7.1	45.21	Muy Alto	4.8	39.8	60.1	0.1	GMF
3	514	10.85	47.37	Muy Alto	6.1	11.46	87.5	1.04	AG
4	256	5.24	48.85	Muy Alto	6.9	57.68	42.16	0.16	AMG
5	215	6.68	32.19	Moderado a Alto	6.8	4	95.86	0.14	AG
6	399	10	39.9	Moderado a Alto	7.2	41.1	58.77	0.13	AMG
7	298	5.16	57.75	Muy Alto	7.5	71.2	28.66	0.15	GMF
8	948	6.12	154.9	Muy Alto	6.9	88.55	11.41	0.04	GM
9	1000	8.58	116.55	Muy Alto	6.9	91.83	8.12	0.05	GM

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA

Con el objetivo de conocer el tamaño de las partículas y de este modo evaluar los diámetros de los granos y la dinámica fluvial a lo largo del canal del río Quinto. Se caracterizaron los sedimentos de la carga de fondo a través del análisis de muestras obtenidas *in situ* en sectores de interés a lo largo del río en su recorrido por el municipio de Villa Mercedes.
La Tabla II resume de los resultados obtenidos con el software GRADISTAT 4.0 a partir de la información de los pesos retenidos durante el tamizado de las muestras en laboratorio. Se puede decir que los sedimentos del sector del canal presentan distribuciones principalmente polimodales y algunas bimodales, constituidas entre los grupos texturales de grava mediana a muy fina y de arenas muy gruesas a arenas gruesas. Muestran una moda promedio en -1,69 phi (grava muy fina) con asimetrías variables (de muy negativa a muy positiva) y curtosis dominante platicúrticas.
Los depósitos de fondo de canal en su mayoría, presentan una dispersión baja (selección muy pobre), pero a diferencia del resto, la muestra 5 exhibe selección moderada y corresponde a la clase arena gruesa, en su composición presenta escaso contenido de grava (4%) y finos (0.14%) en comparación a los altos porcentajes de arena (95.8%).

Tabla II: Parámetros estadísticos obtenidos en cada tipo de muestras y referencias de las abreviaturas. Aclaración: los diámetros de los sedimentos se representan en escala granulométrica Uden-Wentworth (1922).

	Muestra	Distrib.	Moda 1°	Media	Selección		Asimetría		Curtosis		Grava %	Arena %	Finos %	Grupo Textural	Clase
Canal	1	P	-0.24	-1.12	2.33	MPS	-0.45	MN	0.75	P	39.80	60.10	0.10	GA	GMF
	2	P	-0.25	-1.13	2.40	MPS	-0.44	MN	0.77	P	39.40	60.50	0.10	GA	GMF
	3	P	0.75	0.74	1.06	PS	-0.17	AN	0.78	P	11.46	87.50	1.04	AG	AG
	4	P	-2.24	-0.94	2.03	MPS	0.18	AP	0.68	P	57.68	42.16	0.16	GA	AMG
	5	B	0.75	0.34	0.53	MS	-0.37	MN	0.58	MP	4.00	95.86	0.14	AG	AG
	6	P	-1.24	-0.29	1.18	PS	0.05	S	0.87	P	41.10	58.77	0.13	GA	AMG
	7	P	-3.24	-1.61	1.54	PS	-0.13	AN	0.74	P	71.20	28.66	0.15	GA	GMF
	8	B	-5.23	-3.91	1.92	PS	0.86	MP	1.14	L	88.55	11.41	0.04	G	GM
	9	P	-4.24	-3.99	1.63	PS	0.48	MP	1.43	L	91.83	8.12	0.05	G	GM

Distribución	Selección	Asimetría	Curtosis	Grupo textural	Clase
P Polimodal	**MBS** Moderadamente bien seleccionado	**MP** Muy positiva	**MP** Muy platicúrtica	**G** Gravas	**GM** Grava mediana
B Bimodal	**MS** Moderadamente seleccionado	**P** Positiva	**P** Platicúrtica	**GA** Gravas arenosas	**GF** Grava fina
	PS Pobremente seleccionado	**S** Simétrica	**M** Mesocúrtica	**AG** Arenas gravosas	**GMF** Grava muy fina
	MPS Muy pobremente seleccionado	**N** Negativa	**L** Leptocúrtica	**ALG** Arenas ligeramente gravosas	**AMG** Arena muy gruesa
		MN Muy negativa	**ML** Muy leptocúrtica		**AG** Arena gruesa
					AM Arena mediana

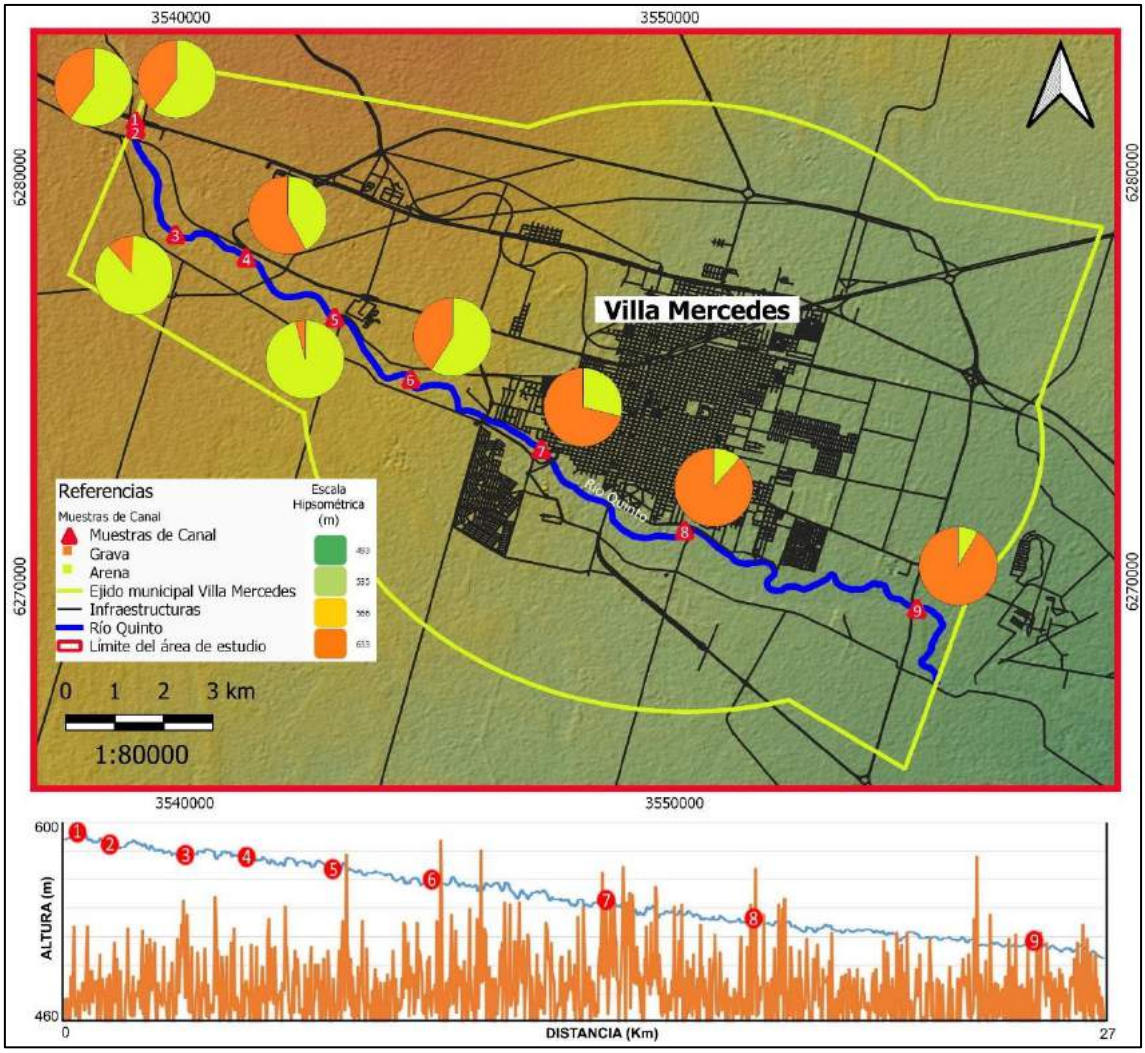


Figura 3: (Arriba) mapa mostrando la distribución espacial de las muestras de fondo. (Abajo) perfil altimétrico (línea de color azul), variación de las anomalías de la pendiente (línea de color naranja) y la distribución longitudinal de las muestras (puntos de color rojo) a lo largo del río Quinto.

El perfil longitudinal del río Quinto “ver Fig. 3”, en el tramo de estudio resulta ser cóncavo, con un índice de concavidad de 1,02 y pendiente general de 0,29 % con un desnivel de 81,92 m en 27,55 km. de longitud.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió reconocer que la relación ancho vs profundidad del canal y las anomalías de la pendiente son de particular interés para comprender las condiciones del transporte y sedimentación de la carga de fondo. A su vez, dichos sedimentos presentan en el tramo estudiado del río Quinto, principalmente distribuciones polimodales alternado entre gravas, arenas gravosas y gravas arenosas, con una moda promedio de -1,69 phi (grava muy fina) y asimetrías que varían de muy negativas a muy positivas y en general platicúrticas.

Los resultados de los sedimentos de fondo de canal indican, que la relación arena-grava va cambiando aguas abajo del recorrido del río Quinto por el municipio de Villa Mercedes, aumentando los porcentajes de grava desde un 39% en muestra 1, hasta valores superiores a 91% en muestra 9. Lo que se interpreta como el resultado de controles naturales y antrópicos. Estos últimos se relacionan a un reajuste del sistema fluvial como respuesta a la presencia de los diques Vulpiani (1904) y Villa Mercedes (2016). El alto porcentaje de arena (95.8%) encontrado en la muestra Nº5, tomada inmediatamente aguas abajo del dique Vulpiani, se atribuye al proceso de desarenado del espejo de agua. Por otro lado, los controles naturales estarían asociados a cambios de la pendiente, variaciones climáticas y controles geológicos (litológicos y estructurales) evidenciados en las anomalías marcadas en el perfil longitudinal.

Por último, se considera que la utilización de los SIG de código abierto como QQIS son de gran utilidad para generar y administrar la información.

REFERENCIAS

Díaz Balocchi, L. A. Geomorfología y sedimentología del campo eólico ubicado al sur de Villa Mercedes, 33° 49´ S, provincia de San Luis, Argentina. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (2016).

Folk, R.L. and Ward, W.C. A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26. (1957).

González Díaz, E. Geomorfología, Geología y Recursos Naturales de Provincia de San Luis. 8° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 193-236, Buenos Aires (1981).

INDEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la República Argentina. https://www.google.com.ar/ (2010).

Magnante, L. 2010. Variaciones morfológicas y morfodinámicas del arroyo El Cano en la última centuria. Causas e implicancias ambientales. Trabajo Final de Licenciatura en Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 121 p., Río Cuarto.

Ramonell, C., Iriondo, M. y Kromer, R. Guía de campo Nº 1, centro-este de San Luis. 5º Reunión de Campo, CADINQUA. Universidad Nacional de San Luis. (1992).

Ramos, V.A. Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, SEGEMAR, Anales 29: 41-96, Buenos Aires. (1999).

REM, 2019. Red de Estaciones Meteorológicas. ULP. http://www.clima.edu.ar

Rosgen D. L., A classification of natural rivers. Catena 22, 169-199. (1994).

Schumm S. A. Pattern of alluvial rivers. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13, 5-27. (1985).

Schumm S. A. The Fluvial System. Wiley, New York-London (1977).

Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. 2019. BDHI: Base de Datos Hidrológica Integrada. http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/
SMN, 2013. Servicio Meteorológico Nacional. www.smn.gov.ar
Wentworth, K "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments", Journal of Geology, Vol. 30, No. 5, pp. 377-392. doi10.1086/622910. (1922).

ANÁLISIS DE NIVELES HIDRÁULICOS Y ESPESORES DE ACUITARDO EN EL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO PAMPEANO – PUELCHE, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Fabiano M. [ab], Sánchez Caro L. [ac], Rodrigues Capítulo L. [ac], Carretero S.C. [ac]

[a]*Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Comisión de Investigaciones Cieníificas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), ARGENTINA*
[c]*Consejo Nacional de Investigaciones Cientíticas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*

e-mail: mfabiano@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

El conocimiento integral del sistema hidrogeológico Pampeano – Puelche en la provincia de Buenos Aires permite mejorar las estimaciones de ciertos parámetros y optimizar el manejo del recurso hídrico. El objetivo de este trabajo es relacionar la diferencia de carga hidráulica entre los acuíferos Pampeano y Puelche con la distribución de espesores del nivel acuitardo que vincula a ambas unidades en el sector de la Cuenca Matanza Riachuelo. Se evaluaron datos de espesores del nivel acuitardo a partir de la descripción litológica de 52 perforaciones y se evaluó la variación de los niveles hidráulicos de ambos acuíferos de los años 2018, 2019 y 2020, a partir de registros de 84 perforaciones. Se elaboró un mapa isopáquico del acuitardo y de isovariación de carga hidráulica para el período estudiado. Se reconoce que la diferencia de carga hidráulica no presenta variaciones significativas con el transcurso del tiempo. Además, se observa que regionalmente las cotas hidráulicas de los niveles del Pampeano se encuentran relativamente más altas que las del Puelche, indicando que la recarga indirecta se produce desde el primero hacia el más profundo. Se demuestra que existe una vinculación entre los sectores de mayor espesor del acuitardo y aquellos donde la diferencia de carga hidráulica es mayor en favor del acuífero Pampeano. Esta condición adquiere una mayor significación en los sectores de explotación intensiva del Puelche. Localmente, se produce una inversión de la diferencia de carga hidráulica en el sector de cuenca baja de la cuenca, en la zona más cercana al Río de la Plata, infiriéndose que en este sector se produciría la descarga del acuífero Puelche.

Palabras Clave: Acuitardo, carga hidráulica, Cuenca Matanza Riachuelo, Pampeano, Puelche.

INTRODUCCIÓN

En el noreste de la provincia de Buenos Aires, los acuíferos Pampeano y Puelche forman parte de un sistema geohidrológico que se sitúa en los tramos superiores de una secuencia sedimentaria que se apoya sobre el basamento cristalino (Yrigoyen, 1975). Este sistema geohidrológico Pampeano – Puelche resulta ser la principal fuente de agua de la región, siendo un sistema de acuíferos multicapa del cual se abastece la población tanto para consumo humano como para otras actividades (industrial, agrícola, ganadera).

A partir de los estudios de EASNE, 1972 y Sala y Auge, 1973 se plantean los primeros esquemas hidrogeológicos del área, en los que adquieren relevancia los acuíferos Puelche y Pampeano, así como también la existencia de un nivel acuitardo, con propiedades semiconfinantes, entre ambos acuíferos. Posteriormente, diversos trabajos abordan temas relacionados al sistema geohidrológico Pampeano – Puelche como son Auge, 1995, Santa Cruz et al, 1997, Auge et al, 2002, Auge, 2005, Amato y Silva Busso, 2006, García et al, 2016.

El área de estudio se localiza en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires y constituye uno de los conglomerados urbanos más importantes del país. La Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) se ubica entre los paralelos 34°36’ y 35°08’ de latitud sur y los meridianos 58°20’ y 59°03’ de longitud oeste presentando una superficie total de 2047 km^2 “ver Fig. 1”.

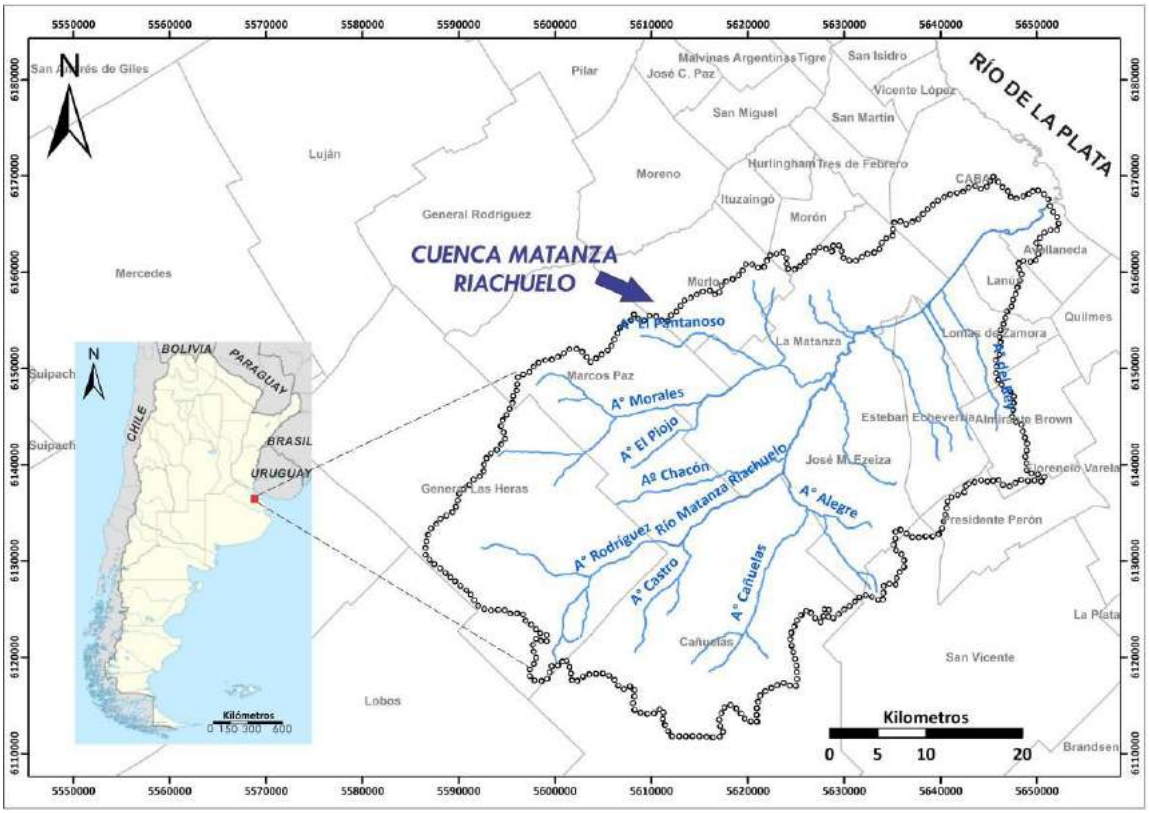


Figura 1. Mapa de ubicación de la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR)

Las características hidrogeológicas de la CMR han sido abordadas en los trabajos de Mancino et al, 2013, Scioli et al, 2013 y Vives et al, 2013, en los cuales se establece una descripción de la geología y geometría de los niveles acuíferos y acuitardos, y se genera un modelo matemático de flujo, planteando tres posibles escenarios en los que el acuitardo presenta distintas propiedades hidráulicas.

En el sistema geohidrológico se halla un nivel de sedimentos limo-arcillosos que conecta al acuífero Puelche con el Pampeano, otorgándole continuidad hidráulica al sistema (Mancino et al, 2013). El acuitardo actúa como una membrana semipermeable

que permite la recarga indirecta del acuífero Puelche por filtración vertical descendente desde el acuífero Pampeano, en los sectores donde el Pampeano presenta mayor potencial hidráulico que el Puelche (Auge, 1986; Sala y Auge, 1973).

Según Auge, 2004 la vulnerabilidad de los acuíferos semiconfinados está controlada por las propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo (permeabilidad vertical, porosidad y espesor) y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el acuífero libre o semilibre sobrepuesto. Esta diferencia de carga hidráulica (Δh) entre un acuífero semiconfinado y otro libre generalmente es pequeña, pero se hace mayor en sectores bajo un régimen de explotación.

En condiciones naturales se reconoce una similitud entre los mapas isofreáticos (acuífero Pampeano) y piezométricos (acuífero Puelche). En las áreas de recarga el acuífero Puelche presenta cargas hidráulicas negativas respecto a las cargas hidráulicas del acuífero Pampeano, mientras que en las zonas de descarga ocurre a la inversa (EASNE, 1972; Auge 1995).

Además, el origen sedimentario de las formaciones que componen los acuíferos freáticos y Puelche, sea fluvial, eólico, de estuario o lagunar, indica la existencia de una heterogeneidad en sentido vertical y horizontal muy importante. Esto condiciona las respuestas de los niveles hidráulicos en distintas zonas de la CMR (Vives et al, 2012).

El nivel acuitardo presente en esta zona posee un espesor promedio de 7 metros, con extremos que van desde los 16 metros hasta ser casi nulo (Fabiano, 2019). Las mayores potencias se encuentran en el sector NNO de la cuenca y en una zona del sector E.

El espesor del nivel acuitardo cumple un rol fundamental en el sistema cuando se encuentra bajo condiciones de bombeo del acuífero Puelche. Esta situación se ve reflejada en la Δh entre ambas unidades acuíferas, infiriendo que en aquellos sectores donde el espesor del acuitardo es mayor, la Δh resultaría mayor “Ver Fig. 2a”, mientras que en sectores donde el espesor del acuitardo es menor, la Δh sería menor “Ver Fig. 2b” (Deluchi, 2010).

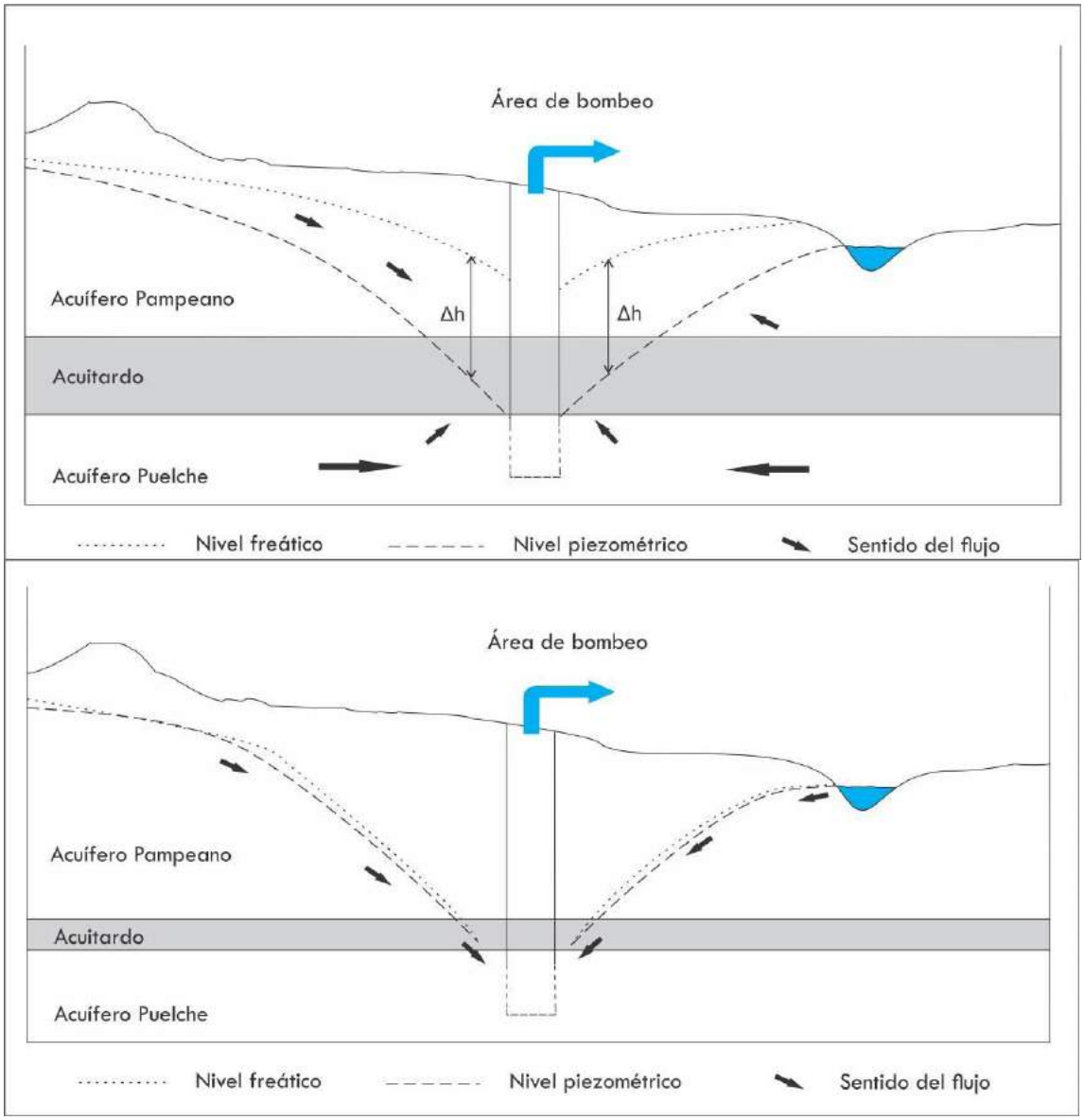


Figura 2. Esquema conceptual de flujo con un acuitardo. **a.** mayor espesor. **b.** menor espesor (Modificado de Deluchi et al, 2010).

El objetivo de este trabajo es relacionar la diferencia de carga hidráulica entre los acuíferos Pampeano y Puelche con la distribución de espesores del nivel acuitardo que vincula a ambas unidades acuíferas en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires. Este objetivo se plantea a partir de reconocer la influencia que tendría el espesor de estos sedimentos limo-arcillosos en el sistema geohidrológico frente a condiciones de explotación de las aguas subterráneas en la zona que comprende a la CMR.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para lograr el objetivo planteado, se tomó como referencia el trabajo de Fabiano, 2019 en el que se describe la distribución de espesores del nivel acuitardo en la CMR,

obtenido a partir de información de perfiles litológicos, perfilajes eléctricos y perfilajes gamma de 52 perforaciones de control distribuidas en el área de estudio.

Se analizaron datos de niveles hidráulicos del acuífero Pampeano y del acuífero Puelche obtenidos a partir de una red de monitoreo conformada por 84 perforaciones, las cuales se encuentran distribuidas en el área de la CMR y cuyos datos fueron aportados por la Autoridad de Cuenca Riachuelo-Matanza (ACUMAR) desde su Sistema de Gestión de Información Hidrológica (BDH-CMR). Los datos de niveles corresponden a los períodos de enero de 2018, agosto de 2018, abril de 2019, septiembre de 2019 y enero de 2020.

La información recopilada fue integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), a partir del cual se generó un mapa base compuesto por los límites de la cuenca, la red hidrográfica del área, la trama de los partidos que se incluyen en la cuenca y la ubicación de las perforaciones de monitoreo. Se confeccionaron mapas de distribución de espesores del nivel acuitardo y de las Δh de los acuíferos para los períodos estudiados.

Para la representación y análisis de la información se trabajó en los formatos vectoriales y ráster. La interpolación de los datos se llevó a cabo empleando el método "Natural Neighbor".

Finalmente se realizó un análisis comparativo de las Δh para cara período y su vinculación con las variaciones de los espesores de los sedimentos limo-arcillosos que componen el acuitardo. Ello demandó una tarea de interpretación, buscando la posible incidencia de estos factores en la dinámica hidrogeológica de la zona de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis de los mapas de isovariación de carga hidráulica realizados para los períodos de enero 2018, agosto 2018, abril 2019, septiembre 2019 y enero 2020 "Ver Fig. 3" se observan sectores de distinto comportamiento dentro de la CMR. Las estimaciones de Δh oscilan entre valores mayores a los 12 metros y menores a 0.

Asimismo, se reconoce que las Δh entre el acuífero Pampeano y el acuífero Puelche en los distintos sectores de la cuenca no presentaron variaciones significativas durante el período analizado.

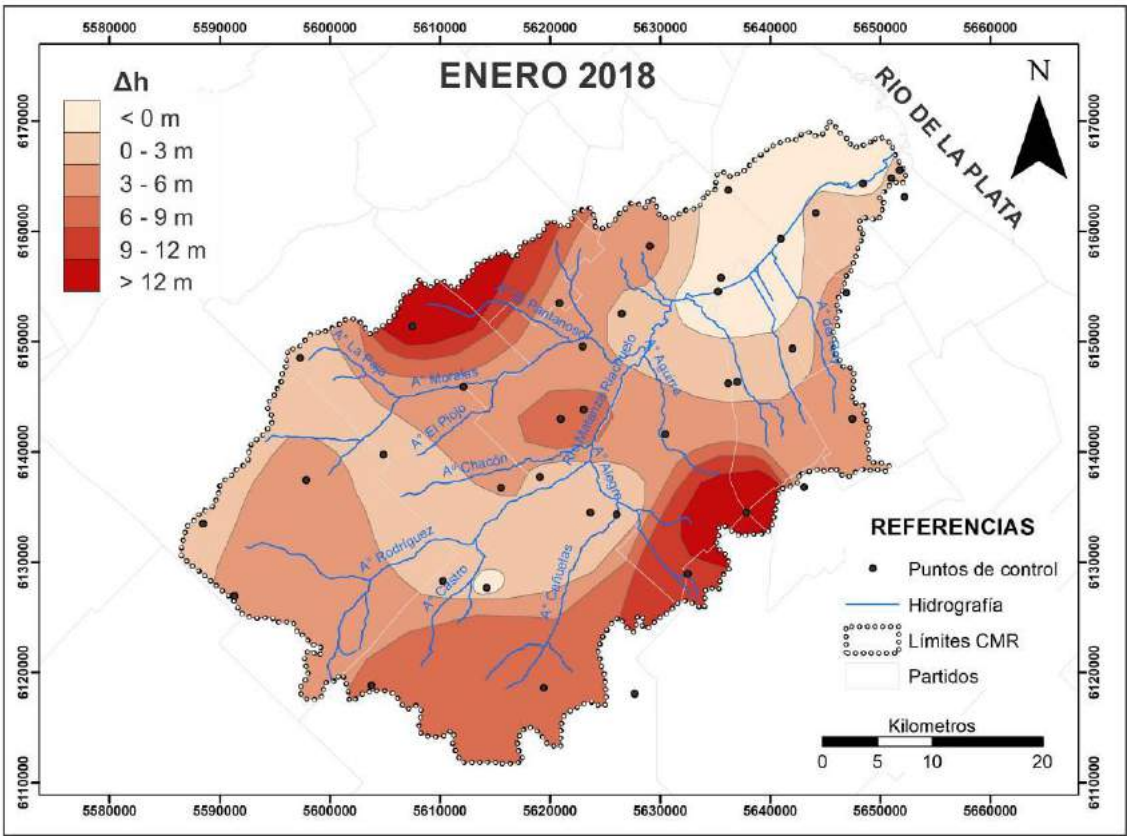


Figura 3. Mapa de isovariación de carga hidráulica enero 2018

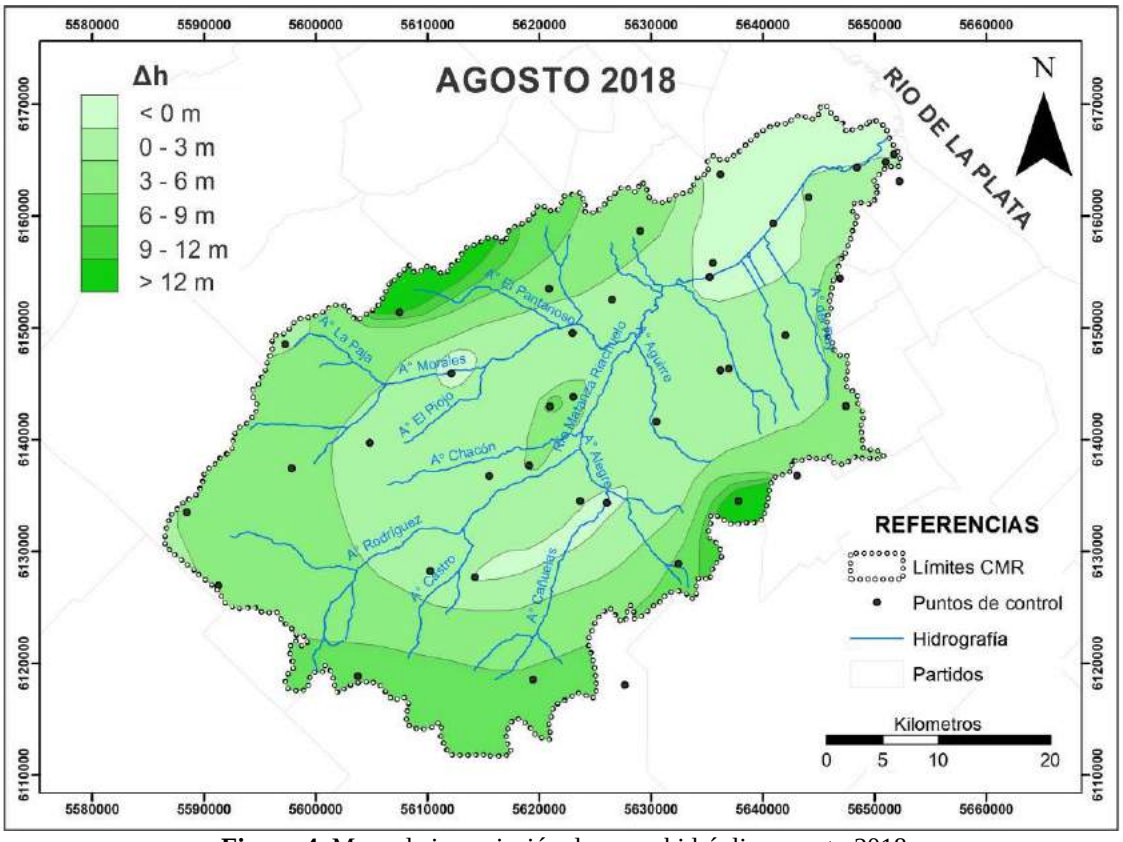


Figura 4. Mapa de isovariación de carga hidráulica agosto 2018

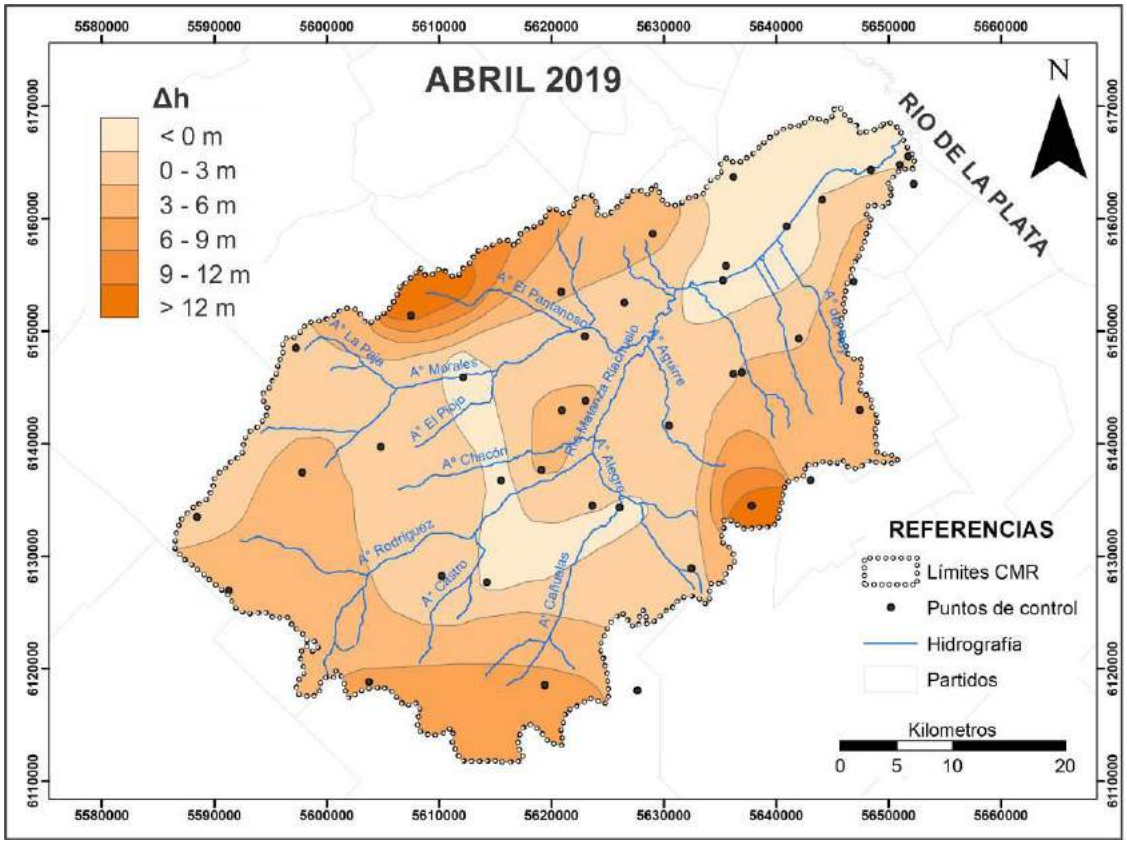


Figura 5. Mapa de isovariación de carga hidráulica abril 2019

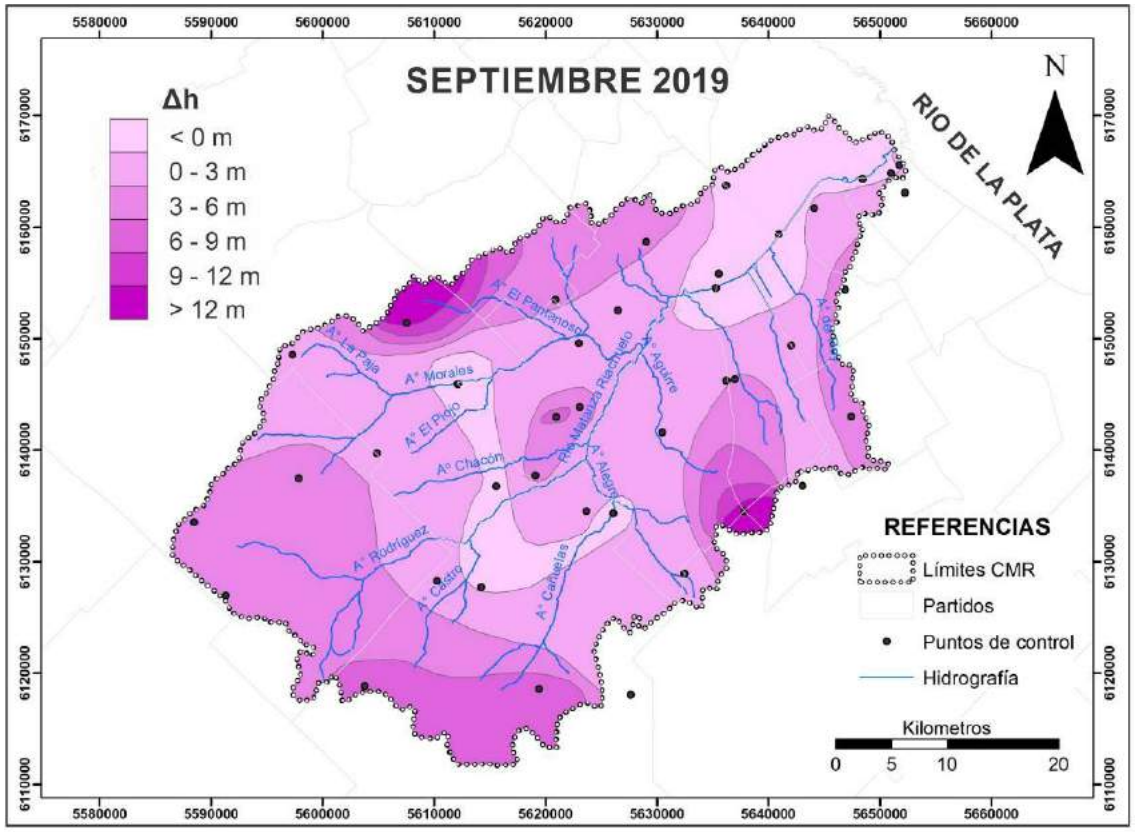


Figura 6. Mapa de isovariación de carga hidráulica septiembre 2019

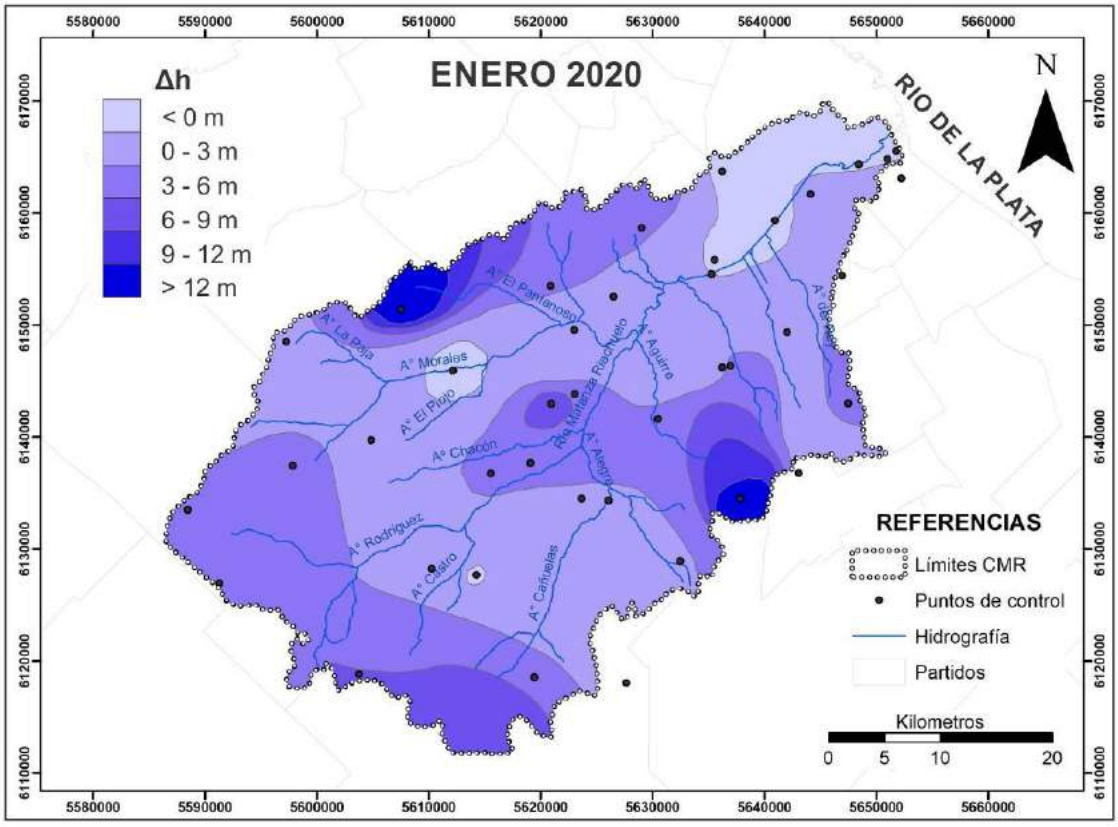


Figura 7. Mapa de isovariación de carga hidráulica enero 2020

En términos generales, en las zonas de cuenca alta y media se observa que las cotas hidráulicas del acuífero Pampeano se encuentran relativamente más altas que las del Puelche, indicando que en estos sectores la recarga se produciría de manera indirecta desde el acuífero Pampeano al acuífero Puelche, siendo el nivel acuitardo la unidad de transferencia entre ambas unidades acuíferas.
Específicamente en un sector de cuenca baja, en la zona cercana al Río de la Plata y en sectores puntuales de la cuenca media, se produce una inversión de Δh. Allí los niveles hidráulicos del acuífero Puelche se posicionan por encima de los del acuífero Pampeano, alcanzando un promedio de 0,5 metros de diferencia. Esta condición permite inferir que en dichos sectores la descarga del acuífero Puelche se produciría en dirección al Río de la Plata.

Las mayores Δh se observan en los sectores NNO y E de la cuenca y en el sector central, con valores superiores, entre los 12 y 15 metros. La comparación entre los mapas de isovariación de carga hidráulica "ver Fig. 3, 4, 5, 6 y 7" y el mapa isopáquico del acuitardo "ver Fig. 8" permitió identificar la relación que existe entre ambos, la cual se pone de manifiesto a partir de una correlación entre los mayores espesores y las mayores diferencia carga hidráulica del Pampeano por sobre el Puelche.

En el borde NNO y E de la cuenca se identificaron los mayores espesores del nivel acuitardo, los cuales superan los 8 metros de potencia. Estos sectores coinciden con los sectores en los que la Δh es mayor, siendo un patrón que se repite en cada uno de los períodos estudiados.

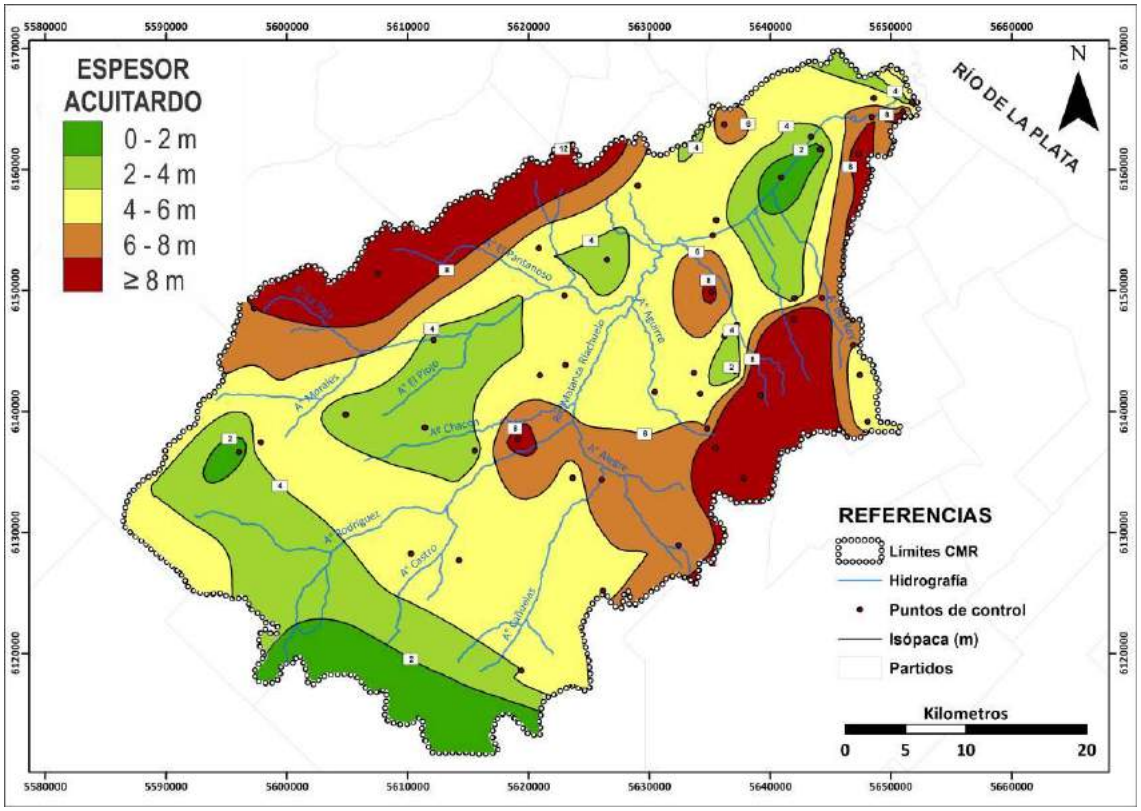


Figura 8. Mapa isopáquico del acuitardo

CONCLUSIONES

En el área de la CMR se visualizan dos situaciones distintas con respecto al comportamiento hidráulico del acuífero Puelche. En los sectores de cuenca alta y media el nivel hidráulico del Pampeano se encuentra relativamente más alto en relación al Puelche, indicando que la recarga se produciría de manera indirecta desde el Pampeano hacia el Puelche. Por otro lado, en el sector de cuenca baja y en sectores puntuales de la cuenca media se produce una inversión de los niveles hidráulicos, posicionándose el nivel hidráulico del Puelche por encima del Pampeano, lo que permite inferir que la descarga del acuífero Puelche se produce en dirección al Río de la Plata.

En el área estudiada se observa que el acuitardo cumple un rol relevante en el funcionamiento del sistema geohidrológico y que su espesor regula las Δh condicionando la transferencia vertical del sistema y, por tanto, en el comportamiento entre ambos acuíferos. En sectores donde el espesor del acuitardo es mayor, se esperaría que se generen mayores Δh, mientras que en sectores donde el espesor es menor, las Δh resultantes serían menores. Esta afirmación se corresponde con lo planteado por Vives et al, 2013 referido a que existen diferencias de nivel hidráulico entre ambos acuíferos en distintos sectores.

En conjunción con lo expresado en el presente trabajo, Vives et al, 2013 afirman que estas Δh son producto de un acuitardo de condición hidráulica variada. Sin embargo, sería conveniente obtener resultados específicos de la condición hidráulica del nivel

acuitardo en distintos sectores de la cuenca, teniendo en cuenta que su espesor y su permeabilidad son variables condicionantes en la determinación de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica vertical (k') o la transmisividad vertical (T').

En condiciones de explotación intensiva del acuífero Puelche, como ocurre en el área estudiada, en los sectores donde el espesor del acuitardo es mayor se genera mayor Δh, dado que el tiempo de tránsito del agua que atraviesa el nivel acuitardo es mayor. El tiempo de tránsito depende de la conductividad vertical de esta unidad semiconfinante, que es menor que la de las unidades acuíferas adyacentes.

Las Δh entre el Puelche y el Pampeano junto con la distribución de espesores del nivel acuitardo son elementos a tener en cuenta en el análisis y evaluación de una región que presenta un incremento de la demanda de agua potable a partir de la explotación del agua subterránea. Este tipo de indicadores resultan útiles para la identificación de aquellas áreas que requieren un control más exhaustivo de los volúmenes de extracción.

Un abordaje integral del sistema geohidrológico que considere la influencia que tiene el nivel acuitardo y sus variaciones en espesor, resulta un indicador útil para la interpretación de los distintos comportamientos acuíferos. En este sentido, este trabajo pretende sumar evidencia en el reconocimiento de un nivel acuitardo que presenta una distribución espesores heterogéneos, y que dichas variaciones podrían ser consideradas como una herramienta eficaz para mejorar el manejo del recurso hídrico subterráneo en un sector que se encuentra afectado por la explotación intensiva.

REFERENCIAS

Amato, S., & Busso, A. S. Relaciones estratigráficas e hidroquímicas de los acuíferos Pampeano y Puelches en el noreste de la provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales nueva serie*, *8*(1), 9-26. (2006)

Auge, M. P. Hydrodynamic Behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin a. *Groundwater*, *24*(5), 636-642. (1986)

Auge, M. P. Manejo del agua subterránea en La Plata – Argentina. *Convenio Intern. Develop. Res. Cen-Univ. de Bs.As. Inédito.* 3 T: 1-149. (1995)

Auge, M. P., Hernández, M., & Hernández, L. Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *XXXII International Hydrogeology Congress* (pp. 624-633). (2002)

Auge, M. P. Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología N°4 – pp 85 – 103.* (2004)

Auge, M. P. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 293-311). (2005)

Base de Datos Hídricos – Autoridad Cuenca Matanza Riachuelo. Recuperado de http://www.bdh.acumar.gov.ar/bdh3/index_contenido.php

Deluchi, M., Kruse, E., Laurencena, P. C., Rojo, A., & Rodrigues Capítulo, L. Características de la explotación de aguas subterráneas en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Aguas Subterráneas y Desarrollo Sustentable de los Pueblos Latinoamericanos (Caracas, Venezuela)*, *10*. (2010)

EASNE. Contribución al estudio geohidrológico del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. *EASNE-CFI. Serie.Téc.24, Tomo I y II.* (1972)

Fabiano, M. Influencia de un nivel acuitardo en el comportamiento hidrogeológico del acuífero Puelche en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires. *Anais XXVII Jornadas de Jóvens Pesquisadores. ISBN 978-85-94099-11-2. Universidade Federal de Sao Carlos, Brasil. pp 5094 -5106* (2019)

García, J. M., Deluchi, M., & Kruse, E. Ambientes de sedimentación vinculados al acuífero Puelche en la región de La Plata. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Catamarca.* (2016)

Mancino, C., Vives, L., Funes, A., Zárate, M. & Martínez, S. Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza—Riachuelo, Provincia de Buenos Aires. 1. Geolgía y geometría del subsuelo. *Temas actuales de la hidrología subterránea, 2013*, 85-92. (2013)

Sala, J. M., & Auge, M. Presencia de capas filtrantes en el noreste de la Provincia de Buenos. Aires. Su determinación. *Actas V Congreso Geológico Argentino* (Vol. 5, pp. 185-194). (1973)

Santa Cruz, J., Amato, S., Silva Busso, A., Guarino, D., & Cernadas, M. Explotación y deterioro del acuífero Puelches en el Área Metropolitana de la República Argentina. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, *31*, 34-37. (1997)

Scioli, C., Vives, L., Burgos, M., & Martínez, S. Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza—Riachuelo, Provincia de Buenos Aires. 2. Cálculo de la recarga. *Temas actuales de la hidrología subterránea, 2013*, 85-92. (2013)

Vives, L., Mancino, C., & Scioli, C. Modelo conceptual y numérico de flujo de agua subterránea de la cuenca del río Matanza-Riachuelo. *Informe Final. Instituto de Hidrología de Llanuras. Informe realizado para la Autoridad de cuenca Matanza-Riachuelo*. (2012)

Vives, L., Scioli, C., Mancino, C., & Martínez, S. Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza—Riachuelo, Provincia de Buenos Aires. 3. Modelo numérico de flujo. *Temas actuales de la hidrología subterránea, 2013*, 101-108. (2013)

Yrigoyen, M. R. Geología del subsuelo y plataforma continental. *Relatorio 6° Congreso Geológico Argentino*. p. 139-168. (1975)

ORIGEN DE LOS FLUJOS DE AZUFRE FUNDIDO EN EL VOLCAN LASTARRIA, UNA PERSPECTIVA DESDE LA GEOQUIMICA DE GASES VOLCÁNICOS

Fernández B[a,b], Inostroza M [a,b, c] y Aguilera F[a,b,c]

[a] *Núcleo de Investigación en Riesgo volcánico Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, CHILE*
[b] *Departamento de Ciencias Geológicas, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, CHILE*
[c] *Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, CHILE*

e-mail:barbarafeerm@gmail.com

RESUMEN

El azufre nativo es una fase mineral comúnmente encontrada en los depósitos fumarólicos de sistemas volcánicos activos con emisiones fumarólicas o desgasificación pasiva. Ocasionalmente, flujos o piscinas de azufre han sido identificados en distintos volcanes del mundo, entre los que destacan volcanes submarinos y con presencia de lagos cratéricos. A pesar de que los flujos de azufre han sido previamente documentados (e.g. volcanes Poás o Kawah Ijen), se desconoce la composición química de la fase gaseosa asociada con su origen y emplazamiento. Este trabajo presenta el primer registro de flujos de azufre fundido observados el 19 de enero de 2019 en el volcán Lastarria, junto con una caracterización química y mineralógica de los flujos solidificados, además de la geoquímica de gases de las emisiones fumarólicas asociadas a la ocurrencia de estos flujos. Los flujos de azufre alcanzaron hasta 12 m de extensión, con temperaturas entre 124 y 158 °C y altas concentraciones de azufre y arsénico, este último relacionado a posibles fases minerales S-As. Los gases fumarólicos asociados a los flujos de azufre registraron mayores temperaturas (entre 268 y 360 °C) y altas concentraciones de H_2 (hasta 71 mmol/mol), las que exceden significativamente los valores promedios previamente registrados (8.5 mmol/mol). La composición química de las emisiones de gases de alta temperatura contemporáneas a las manifestaciones de azufre fundido entrega pistas acerca del origen de los flujos de azufre. Estas pistas sugieren que acuíferos sub-superficiales asociados al sistema hidrotermal del volcán interactúan con vapores supercalentados, provocando el cracking termal o rotura de las moléculas de agua evidenciada por las anomalías de H_2. Este proceso generaría una presión y temperatura suficiente para fundir el azufre depositado en los alrededores de las emisiones fumarólicas.

Palabras Clave: flujo de azufre, cracking termal, vapor de agua, fumarolas, arsénico, volcán Lastarria.

INTRODUCCIÓN

El azufre es uno de los mayores constituyentes en la fase fluida de un volcán activo. Su presencia es fácilmente distinguible en superficies amarillentas y anaranjadas en los depósitos fumarólicos, producto de la desublimacion y/o condensación de la fase gaseosa enriquecida en compuestos de azufre (e.g. SO_2, H_2S). En estos depósitos, el azufre se presenta como sublimados o incrustaciones (i.e. fase sólida), sin embargo, la presencia de flujos y piscinas de azufre es un fenómeno particular que está restringido a ciertos sistemas volcánicos. Una de las particularidades del azufre es su relación de temperatura, viscosidad y color. El azufre se funde a 119 °C y alcanza su mínima viscosidad alrededor de los 160 °C (MacKnight and Tobolsky 1965). Sobre esta temperatura, el azufre fundido aumenta su viscosidad hasta en cuatro ordenes de magnitud (MacKnight and Tobolsky

1965; Naranjo, 1985). El azufre en estado líquido ha sido observados tanto en volcanes terrestres (e.g *Siretoko-Iosan; Wanatabe, 1940)*, como en algunos volcanes submarinos (e.g. MTJ-1 y NW-Rota 1; Butterfield, 2006), volcanes de conducto abierto y volcanes con lagos cratéricos (e.g. Poás; Mora-Amador, 2018) e incluso en la luna "Io" próxima a Júpiter.

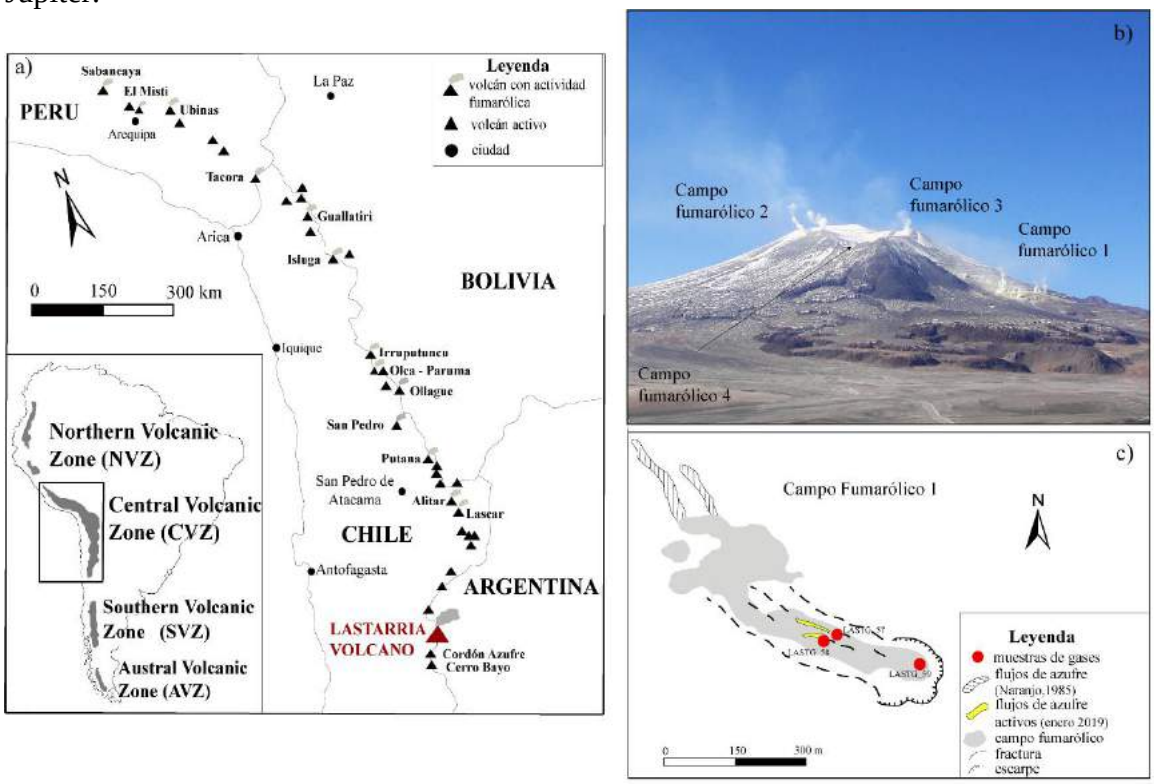


Fig 1. (a) Mapa de distribución de los centros volcánicos en la Zona Volcánica Central de los Andes, donde se destacan los centros con actividad fumarólica y el volcán de estudio. Modificado de De Silva y Francis (1991); (b) Distribución de los cuatro campos fumarólicos del volcán Lastarria; (c) Esquema representativo del campo fumarólico 1, donde se presentan los flujos de azufre y las respectivas muestras de gases obtenidas.

El volcán Lastarria (25,185 ºS - 68,507 ºW, 5.706 m s.n.m.) es un estratovolcán activo de la Zona Volcánica Central (Fig.1a), pertenece a la cadena volcánica conocida como "Lazufre" (Lastarria – Cordón del Azufre; Pritchard y Simons, 2002) y al Complejo Volcánico Lastarria (CVL). Presenta una actividad fumarólica que ha sido continua desde su descubrimiento afines del siglo XIX (Casertano, 1963; González-Ferrán, 1995), la cual se exihibe en cuatro campos fumarólicos (Fig. 1b). Los gases fumarólicos alcanzan temperaturas de hasta 408 °C y se componen de una mezcla de componentes magmaticos e hidrotermales, los que corresponden a dos tipos de fluidos como vapores supercalentados desde una desgasificación magmática y gases producidos por un acuífero en ebullición poco profundo (Aguilera et al., 2012). El comportamiento de los fluidos en el volcán Lastarria ha sido constantemente monitoreado, y recientemente (a partir del año ~2011) se ha identificado un aumento en la concentración de los componentes de origen magmático, tales como SO_2, HCl y HF (e.g., Tamburello et al., 2014; Lopez et al., 2018). La persistente e intensa actividad fumarólica ha originado extensos flujos de azufre (hasta 300 m) con morfologías tipo pahoehoe (Naranjo 1985). A pesar de que los flujos de azufre han sido registrados y caracterizados en distintos lugares del mundo, y distintas teorías han sido consideradas para explicar sus mecanismos de formación, no existe información acerca de la relación entre la composición química de los gases fumarólicos y la

formación de flujos y piscinas de azufre. Este trabajo documenta por primera vez la ocurrencia de flujos de azufre fundido en el volcán Lastarria, presenta una caracterización química y mineralógica de la fase sólida y la composición química de la fase fluida, con la finalidad de comprender los procesos fisicoquímicos involucrados en su formación.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología de trabajo puede ser dividida en 2 etapas: i) Trabajo de campo y muestreo y ii) Análisis de Laboratorio.

(i) Trabajo de campo y muestreo: esta etapa consistió en dos etapas de terreno que se realizaron en enero y noviembre del 2019. En la primera visita al volcán Lastarria en el mes de enero se identificaron flujos de azufre fundidos y una piscina de azufre en el campo fumarólico 1 (Flanco NW; Fig. 1c). En la cercanía de estos flujos de azufre se tomaron 3 muestras de gases volcánicos mediante muestreo directo (Fig. 1c). Este muestreo realizó utilizando un tubo de titanio de 50 cm de largo (diámetro, Ø = 2.5 cm) insertado directamente en la emisión fumarólica, en el cual se conectan un tubo doble camisa de vidrio *pyrex y* un tubo de doble salida, el primero evita la condensación de la fase gaseosa y el segundo facilita el muestreo del gas, evitando turbulencias al interior de la línea de vidrio. En el tubo de doble salida se conecta una ampolla de muestreo (60 mL de volumen con válvula Thorion®), al vacío y con 20 mL de solución alcalina 4M NaOH y 0.15M $Cd(OH)_2$ (Montegrossi et al., 2001). Durante el muestreo, la solución alcalina evita la reacción entre el SO_2 y el H_2S, el SO_2 permanece en solución y el H_2S precipita en forma de CdS. Lo gases incondensables (e.g N_2, He, CO, O_2, Ar, gases nobles, H_2, CH_4, y otros compuestos orgánicos) permanecen en el espacio de cabeza, los gases ácidos (e.g SO_2, HCl y HF) son disueltos en la solución alcalina, mientras que H_2S precipita (como CdS) en la base de la ampolla. Se registró su temperatura mediante una termocupla termopar HI93500N y una sonda de temperatura. Además, se realizaron mediciones de temperatura en la parte proximal y distal de los flujos de azufre fundido y directamente en la piscina de azufre. Desde el fundido se obtuvieron dos muestras, las cuales fueron colectadas en un frasco de vidrio (Fig. 2a). Del mismo modo, la concentración de los gases tales como CO_2, SO_2, H_2S y H_2 fue medida in-situ con un MultiGAS portátil. Se realizó un transecto caminado que comenzó desde la zona alta del campo fumarólico 1. En este transecto también se realizó medición desde la desgasificación de los flujos de azufre. Las distancias de medición variaron entre 1-5 m desde la superficie, en un tiempo total de ~35 min.

(ii) Análisis de laboratorio: las muestras de gases fumarólicos obtenidas mediante muestreo directo fueron analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Departamento de Ciencias de la Tierra en la Universidad de Florencia (Italia). Los gases N_2, ($Ar+O_2$), H_2, He que se encuentran en el espacio superior de la ampolla fueron analizados mediante cromatografía de gases, utilizando un instrumento Shimadzu 15A. El Ar y el O_2 se analizaron utilizando un cromatógrafo de gases Thermo Focus equipado con una columna de tamiz molecular capilar de 30 m de longitud y un TCD. El CH_4 y los hidrocarburos ligeros se analizaron mediante Shimadzu 14A (Vaselli et al., 2006) con un error analítico de <10%. Las fases líquidas y sólidas disueltas en la solución alcalina fueron sometidas a centrifugación. Desde la fase líquida se analizó CO_3^{2-} (proveniente de la disolución de CO2) mediante titulación acidimétrica (utilizando HCl 0.5 N), mientras que SO_4^{2-} (proveniente de la disolución de SO_2), Cl^- (proveniente de la disolución de HCl) y F^- (proveniente de la disolución de HF) fueron analizados mediante cromatografía iónica (Metrohm Compact 761) (Tassi et al., 2004, 2009). Desde la fase sólida, el precipitado de CdS (proveniente de la reacción entre H_2S y $Cd(OH)_2$) fue oxidado a SO_4^{2-}

usando H_2O_2, para posteriormente ser analizado por el método de cromatografía iónica (Montegrossi et al., 2001).

Las muestras sólidas extraídas desde los flujos y piscina de azufre fueron analizadas mediante Microscopio Electrónico de Barrido de Emision de Campo (FESEM)-Energía dispersiva de rayos X (EDS) y Difracción de Rayos X (DRX), en el Departamento de Ciencias Geológicas y la Unidad de Equipamiento Científico (MAINI) de la Universidad Católica del Norte (UCN). Las tres muestras sometidas a análisis de DRX fueron pulverizadas y luego tamizadas (tamiz <0,075mm). Las condiciones de operación fueron: 40 kV de voltaje, 30 mA intensidad de corriente, radiación Cu Kα (I = 1.5406 Å), un detector de centelleo y un monocromador de grafito.Para obtener imágenes en alta resolución de la superficie de la muestra y la composición química de las muestras de flujos de azufre con bajo voltaje de aceleración (0.6 nm a 15 kV y 1.2 nm a 1 kV), se utilizó el equipo FESEM-EDS.
Los análisis de Espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo de alta resolución (HR-ICP-MS) fueron realizados en el Laboratorio de espectrometría de masa del "Helmholtz-Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geoscience" (Potsdam, Alemania) con el equipo de doble enfoque *Thermo Finnigan Element2*, con el objetivo de determinar la composición química de elementos trazas (As, Cd, Co, Cs, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Th, U y Zn).

RESULTADOS

En la campaña de terreno realizada en enero de 2019, se observo por primera vez flujos de azufre fundido y una pequeña piscina de azufre en el campo fumarólico 1 del volcán Lastarria. Uno de los flujos de azufre alcanzó 7 m de largo, 1.08 m de ancho y un espesor promedio de 0.02 m en la parte distal (Fig 2a). Las temperaturas in situ en los flujos de azufre iban desde 158 °C en la fuente hasta 124 °C en el frente del flujo, mientras que la piscina presentaba 140 °C. Los flujos se desplazaron sobre pendientes entre 11-15° con una viscosidad baja-media, y se enfriaban desde el borde al centro, formándose una corteza en enfriamiento gris en el borde (Fig. 2a). La piscina de azufre se encontraba altamente viscosa y con coloraciones rojizas (Fig. 2b).
Se obtuvieron muestras de la fase solida (azufre fundido solidificado) y de la fase gaseosa: las primeras se obuvieron directamente desde la piscina y flujo de azufre, mientras que las muestras de gases se obuvieron mediante un muestreo directo y se midieron gases mediante un MultiGAS.



Fig 2. (a) Uno de los flujos de azufre observados con una viscosidad baja a media, y temperatura de 124 °C en el frente. Espesor estimado de 0.02 m, 1.08 m de ancho y 7 m de extensión; (b) pequeña piscina de azufre con alta viscosidad con temperatura de 140 °C y toma de muestra en un frasco de vidrio.

Composición química y mineralógica

Tres muestras de azufre fundido fueron sometidas a análisis químicos (HR-ICP-MS y FESEM-EDS) y mineralógicos (DRX). Una muestra correspondiente al flujo de azufre (Last_F2) y dos muestras extraídas desde una piscina de azufre fundido (Last_F1A, Last_F1B).

Los análisis mineralógicos identificaron la presencia de azufre de tipo ortorrómbico, en un 100% de abundancia. Asímismo, los análisis FESEM-EDS entregan una información detallada acerca de la distribución de los elementos químicos, texturas y posibles fases mineralógicas (e.g., Fig. 3).

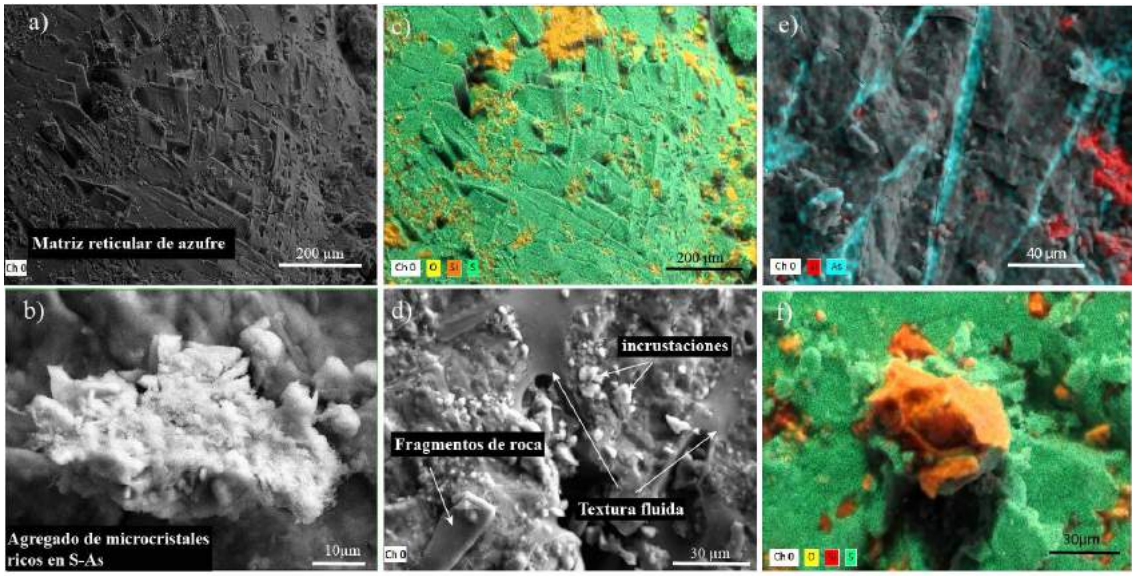


Fig 3. Imágenes SEM-BSE y SEM-EDS mostrando la distribución de los elementos químicos en las muestras analizadas. (a) Matriz reticular de azufre asociadas a las primeras etapas de cristalización del azufre nativo; (b) Agregado de microcristales ricos en S y As, posiblemente rejalgar u oropimente; (c) Distribución de azufre y fragmentos ricos en Si y O; (d) Textura fluida, incrustaciones y pequeños fragmentos de roca; (e) Matriz masiva de azufre con fragmentos ricos en Si y O de tamaño 40 mm; (f) Fragmento silicatado (Si y O) de tamaño 40.

El arsénico es el elemento traza más abundante en las muestras analizadas, con concentraciónes >40.000 ppm, mientras que elementos como Sb, Pb y Cu se encuentran en concentraciones significativas (hasta 56, 31 y 18 ppm, respectivamente). Otros elementos como Cd, Cs, Co, Li, Mo, Ni, Rb, Th, U, Zn están presentes en menores concentraciones (hasta 0.54, 0.6, 0.6, 0.6, 2.1, 1.1, 5.6, 1.4, 0.5 y 18 ppm respectivamente (Tabla 1). Similarmente, altas concentraciones de As y Sb fueron previamente obtenidas en muestras de gas volcánico condensado y muestras de sublidamos e incrustaciones (Aguilera et al., 2016).

De acuerdo con los análisis químicos de FESEM-EDS el azufre es el elemento más abundante. Se observa en primeras fases de cristalización con tamaños aproximados a 20 µm formando una matriz reticulada de azufre (Fig. 4a). El segundo elemento más abundante es el arsénico, el cual se observa acompañando al azufre en agregados de microcristales anhedrales (Fig. 4b), y también se observa rellenando fisuras con una textura de flujo (Fig. 4e). Además se observan fragmentos de 45-200 µm de tamaño ricos en Si y O (Fig. 4f), y ocasionalmente acompañados por otros elementos como Ti y K, fueron encontrados en las muestras seleccionadas. Estos fragmentos corresponden a incrustaciones en la matriz reticular azufre elemental (Fig. 4c). Los cuales estarían

relacionados a fragmentos silicatados incorporados y transportados por los mismos flujos de azufre desde su emplazamiento.

Tabla 1. Ubicación (UTM, datum WGS-84) de las muestras de azufre fundido y concentración química (ppm) de elementos trazas en flujos y piscina de azufre, obtenidos mediante análisis de espectrometría de masa HR-ICP-MS.

Muestra	**Last_F1A**	**Last_F1B**	**Last_F2**
	Piscina de azufre		**Flujo de azufre**
Coordenadas	7217710 N; 548421 E		7217782 N; 548243E
Unidad	[ppm]	[ppm]	[ppm]
Li	0.3	0.2	0.6
Cd	0.03	0.05	0.54
Pb	4.9	4.6	31
Bi	20	18	10
Th	0.6	0.4	1.4
U	0.2	0.2	0.5
Sc	0.1	0.1	0.2
Co	0.2	0.2	0.6
Ni	0.7	0.7	1.1
Cu	12	11	18
Zn	18	12	4.3
Ga	0.2	0.2	0.4
Rb	3.0	2.1	5.6
Sr	5.3	3.6	7.9
Zr	5.1	5.2	11
Nb	0.7	0.6	1.1
Mo	0.6	0.5	2.1
Sb	6.8	5.9	56
Cs	0.3	0.2	0.6
Sn	3.4	2.9	1.2
V	1.4	1.1	2.5
As	40907	42268	6979

Los análisis mineralógicos (DRX) se limitaron a identificar una única fase cristalina en las 3 muestras (Last-F1A, Last-F1B, Last-F2). Azufre de tipo ortorrómbico en 100% de abundancia se identificó todas las muestras. Los porcentajes de cristalinidad en flujos alcanzo 64%, mientras que en las muestras de piscina de azufre alcanzo 46%.

Geoquímica del gas

Se obtuvieron tres muestras de gases a través de muestreo directo en fumarolas cercanas a los flujos de azufre y a la pequeña piscina de azufre fundido. Estas registraron temperaturas entre los 268 y 360°C. Las emisiones fumarólicas cercanas a los flujos y piscinas de azufre activos, registraron temperaturas entre los 268 y 360 °C. El componente más abundante en los gases fumarólicos es H_2O, cuyas concentraciones variaron entre 682 y 703 mmol/mol, mientras que el segundo componente más abundante fue el CO_2, con concentraciones variables entre 175 y 188 mmol/mol. Hidrógeno alcanzó concentraciones de 71 mmol/mol, mientras N_2 presentó valores máximos de 9.6 mmol/mol. Así mismo, SO_2 mostró concentraciones relativamente altas que varían entre 33 y 41 mmol/mol, mientras que el HCl, H_2S y HF alcanzan valores de 5.2, 5.6 y 0.88 mmol/mol, respectivamente. Otros compuestos de carbono, como el CO alcanzaron concentraciones de hasta 0.0096 mmol/mol, mientras CH_4 presentó valores $\leq$0.00013 mmol/mol. Las concentraciones de O_2, Ar y He fueron $\leq$0.079 mmol/mol. La

composición química (mmol/mol) de las fumarolas volcánicas del volcán Lastarria son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ubicación (UTM-WGS-84), temperatura (°C) y composición química (mmol/mol) de las muestrasde gas recolectadas en las proximidades de las manifestaciones de azufre fundido (flujos o piscinas de azufre) el 18 de enero de 2019.

Muestra	**LT57**	**LT58**	**LT59**
	Flujo	**Flujo**	**Piscina**
Cord N	7217781	7217780	7217710
Cord E	548249	548249	548421
Altitude	5087	5086	5134
T (°C)	268	360	290
H_2O	703	699	682
CO_2	175	186	188
HCl	4.6	5.2	4.9
HF	0.69	0.88	0.79
SO_2	33	41	39
H_2S	5.6	3.2	4.9
N_2	9.6	9.1	8.8
CH_4	0.00013	0.00011	0.00012
Ar	0.056	0.061	0.079
O_2	0.016	0.0085	0.0091
H_2	68	55	71
He	0.0011	0.0015	0.0009
CO	0.0087	0.0079	0.0096

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Composición química y mineralógica

La composicion química de flujos y piscina de azufre tiene amplia variedad de elementos químicos como lo evidenciaron los elementos trazas (HR-ICP-MS) y las imágenes BSE (FESEM-EDS). El azufre y el arsénico son los elementos más abundantes. Se destacan agregados microcristalinos que podrían evidenciar fases mineralógicas ricas en As-S como rejalgar u oropimente (Fig. 3c). Este tipo de fases mineralógicas le otorgarían el color rojizo a los flujos y piscinas de azufre, como ocurre en piscinas de azufre en otros sistemas volcánicos (Ikehata et al., 2019), así como también en los depósitos fumarólicos del volcán Lastarria (Inostroza et al., 2020) donde se ha encontrado oropimente. Los fragmentos ricos en Si, O, K y Ti representan fragmentos accidentales incorporados en el emplazamiento y desplazamiento de estos flujos desde los depósitos fumarólicos. Estos elementos (e.g. Fe_3O_4, KCl, SiO_2, $K_3Na(SO_4)_2$, entre otros; Africano et al., 2002) usualmente forman asociaciones minerales en sistemas volcánicos de elevada temperatura (> 400 °C).

Estos flujos de azufre se diferencian a los descritos por Naranjo (1985, 1988), los cuales alcanzaron mayores extensiones (hasta 300 m) y se caracterizaban por coloraciones amarillas a anarajadas (Naranjo, 1985), mientras que estos flujos presentaban coloraciones rojas a pardas intensas. Sin embargo al no tener datos de química de los flujos de azufre descritos con anterioridad, no se puede hacer una comparación más detallada con respecto a la composicion química y su relación a las diferencias en las coloraciones mencionadas.

Origen del gas

La composicion química de las muestras de gases evidencian cambios importantes en las concentraciones de H_2O (hasta 703 mmol/mol), CO_2 (hasta 188 mmol/mol), St (hasta 56.6 mmol/mol) y considerablemente en el H_2 (hasta 71 mmol/mol), si las comparamos con las últimas mediciones realizadas en el volcán Lastarria, donde estos gases alcanzan concentraciones 919, 56, 20 y 0.51 mmol/mol, respectivamente (Lopez et al., 2018).

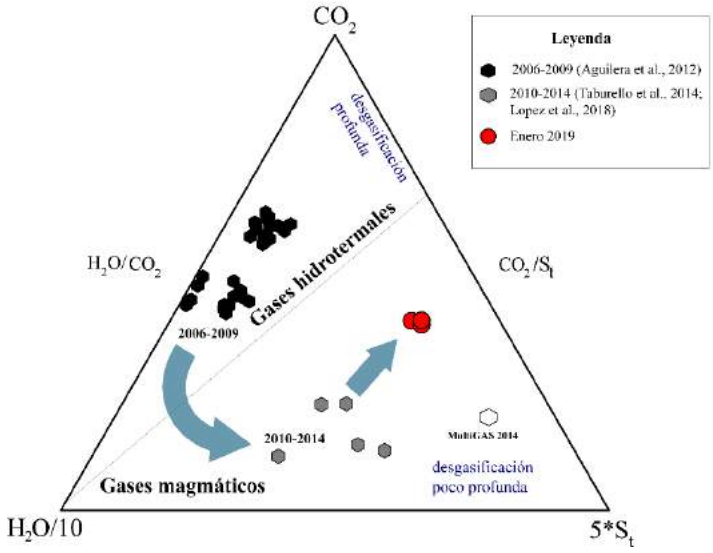


Fig 4 . Diagrama ternario 5St-CO_2-H_2O/10 para gases fumarólicos en el volcán Lastarria. Los círculos rojos corresponden a las muestras que se relacionan a la presencia de flujos y piscina de azufre. Las otras muestras de color gris y negras corresponden a trabajos de Aguilera et al., 2012, Tamburello et al., 2014 y Lopez et al., 2018.

Con el objetivo de representar y dar una posible explicación a estos cambios mencionados, se presenta el diagrama ternario 5St-CO_2-H_2O/10, el cual permite distinguir entre una fuente magmática y una fuente hidrotermal a partir de las razones típicas de CO_2/St. Las razones CO_2/St en sistemas hidrotermales comumente son > 10, mientras las magmáticas son < 10 (línea separación) (Fischer y Chiodini, 2015).

La fig. 4 evidencia la evolución que ha tenido el volcán Lastarria entre el periodo 2006-2009 (Aguilera et al. 2012) y 2010-2014 (Tamburello et al., 2014; Lopez et al 2018) y cómo esta evolución se relaciona a las composciones obtenida en este trabajo. Las muestras se encuentran desplazadas por las altas concentraciones relativas de St, representando una desgasificación profunda a diferencia de las últimas muestras obtenidas en el volcán Lastarria (Lopez et al, 2018), las cuales representarían una desgasificación somera. Las altas concentraciones de St podrían explicarse por una descompresión de la cámara magmática, uno de los escenarios propables propuestos por Lopez et al., 2018, mientras que las bajas concentraciones de agua podrían estar relacionadas a las altas concentraciones de H_2 por un proceso de cracing de las moléculas de agua.

El diagrama ternario de gases no reactivos Ar-N_2-He (Fig. 5a), el Ar, N_2 y He representan un origen atmosférico, magmático (zonas de subducción) y mantélico/cortical, respectivamente. Estas muestras se encuentran desplazadas por las concentraciones relativas de Ar, evidenciando un contribución atmosférica, lo que podría explicarse por la interacciones de estos gases con un acuifero en ebullición poco profundo asociado al

sistema hidrotermal del volcán. Esto difiere a lo que se esperaría para una zona de subducción, donde se presentan mayores concentraciones de N_2 (Giggenbach, 1992b).

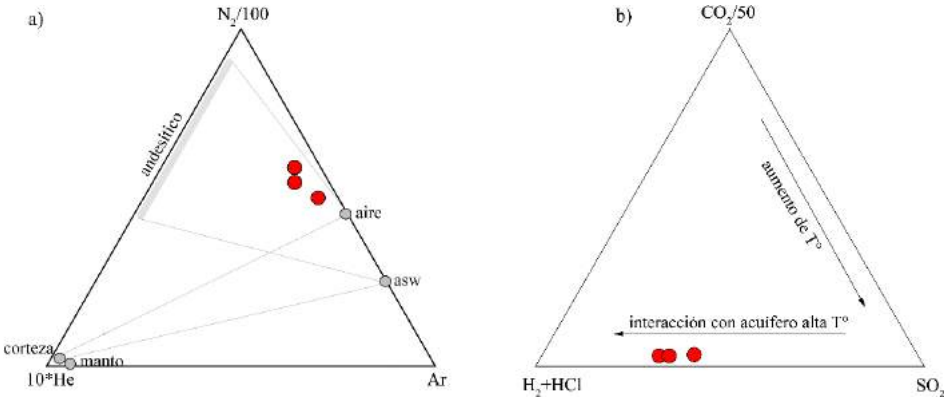


Fig 5. Diagramas ternarios con muestras de gases relacionadas a los flujos y piscinas de azufre. (a) Diagrama Ar-N_2-He; (b) Diagrama SO_2-CO_2-(H_2+HCl).

Una de las particularidades en la composición química de la fase gaseosa tiene relación con las altas concentraciones de H_2. Con el objetivo de precisar el origen del H_2, se presenta el diagrama ternario SO_2-CO_2-(H_2+HCl) (Fig. 5b), donde las altas concentraciones de H_2 desplazan los datos hacia el vértice H_2+HCl, el cual representa interacciones gas-agua-roca que ocurren a altas temperaturas (Martini, 1993). En el caso del Lastarria, este proceso evidencia la interacción de gases de alta temperatura con un acuifero en ebullición poco profundo. De acuerdo con Aguilera et al. (2012), datos isotópicos de oxígeno y deuterio en gas condensado indican que el vapor de agua transportado por las emisiones fumarólicas es de origen más bien magmático, presentando valores cercanos a los denominados "aguas andesíticas". Estas concentraciones de H_2 obtenidas difieren ampliamente a lo esperado en la ZVC. En el volcán Lastarria el H_2 ha alcanzado hasta 8.5 mmol/mol, mientras que en otros sistemas volcánicos del norte de Chile solo se han alcanzado hasta 20 mmol/mol; Tassi et al., 2009, 2011).

Geotermometría

Los geotermómetros son herramientas útiles para comprender las condiciones de los gases en profundidad y en su ascenso a la superficie, es decir, entregan información detallada sobre las condiciones fisicoquímicas que en este caso ayudaría a dilucidar el origen de estos gases y su relación con la producción de azufre fundido. La relación R_H = log(H_2/H_2O) es el parámetro más idóneo para describir potencial redox en sistemas geoquímicos (Giggenbach, 1987). El diagrama R_H versus temperatura de emisión (Fig. 6a) describe las condiciones en profundidad del sistema volcánico considerando solo la fase vapor. Las muestras presentan valores de R_H ~ -1, indicando condiciones reductoras al interior del sistema, gatillado por el aumento de H_2 y la disminución en la concentración de H_2O. Al ser muestras de origen magmático es más representativos evaluarlas al buffer H_2S-SO_2 por proceso de quenching. Si se extrapolan están muestras al buffer, las emperaturas de equilibrio alcanzarían 1000 °C. Esto se explicaría debido a que las muestras están fuertemente influenciadas por procesos secundarios someros, posiblemente por la interaccion el acuífero poco profundo.

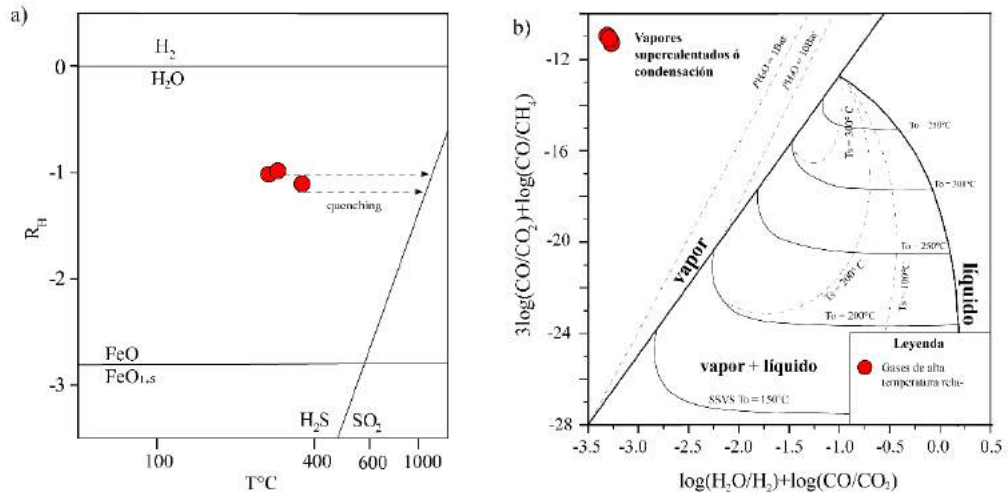


Fig 6. (a) Diagrama R_H vs. temperatura (°C) (Giggenbach 1997) de los gases fumarólicos del volcán Lastarria. Líneas sólidas representan el buffer hidrotermal (FeO-$FeO_{1.5}$) y magmático (H_2S/SO_2) (Giggenbach 1987); (b) Diagrama binario $3\log(CO/CO_2)+\log(CO/CH_4)$ vs. $\log(H_2O/H_2)+\log(CO/CO_2)$. Las líneas sólidas gruesas representan a la fase vapor saturada simple (vapor) y fase líquida saturada simple (líquido), líneas sólidas delgadas (en campo vapor+líquido) representan la composición de vapor separado desde un líquido por estado o paso simple a temperaturas iniciales To = 150, 200, 250, 300 y 350ºC y finalmente líneas punteadas representan la composición resultante desde un vapor separado de un líquido por estado o paso simple a temperaturas fijas Ts de 100, 200ºC y 300ºC.

Los sistemas hidrotermales constituidos por fases de vapor y líquido se les conoce como sistemas bifásicos, donde los geotermómetros en el sistema H_2O-H_2-CO_2-CO-CH_4 (Chiodini y Marini 1998) pueden ser utilizados con la finalidad de determinar los procesos secundarios que posiblemente afectan la composición de los fluidos en su ascenso a superficie. De acuerdo con el sistema H_2O-H_2-CO_2-CO-CH_4 (Fig. 6b), se deduce que la fase gaseosa provienen desde vapores supercalentados o condensación de la fase gaseosa, con presiones <1 Bar, las cuales están fuertemente influenciadas por la anomalía del H_2.. A partir de esto, se deduce un ascenso de gases a altas temperaturas y la interacción con acuíferos someros (Fig.6b) generándose vapores supercalentados. Sin embargo no se tiene información adicional para descartar procesos de condensación.

Origen y emplazamiento

El volcán Lastarria presenta un sistema magmático-hidrotermal, donde la composición química e isotópica de los fluidos indica que estos provienen directamente desde una cámara magmática profunda y desde procesos de interacción gas-agua-roca típicos en los fluidos de origen hidrotermal (Aguilera et al., 2012). Los fluidos de origen magmático-hidrotermal son comúnmente encontrados en volcanes con manifestaciones de azufre fundido (Mora-Amador, 2018). Asimismo, el desarrollo o producción de azufre fundido tiene estrecha relación con la presencia de un sistema hidrotermal en el edificio volcánico. Por ejemplo, manifestaciones de azufre fundido son comúnmente encontradas en sistemas volcánicos que presentan lagos cratéricos (e.g Copahue; Delpino and Bermudez, 1996), acuíferos subterráneos, manifestaciones termales y volcanes submarinos (e.g Rota-NW; Butterfield, 2011). Del mismo modo, la inyección de vapor de agua a elevadas presiones ha sido utilizada históricamente en métodos de extracción de azufre fundido (método de Frasch). La composición química de los gases ha evidenciado una condición fisicoquímica que presentaba el volcán al momento del emplazamiento de azufre fundido. De esta manera, se sugiere que piscinas y flujos de azufre se generaron en una condición anómala, donde factores como la presencia de acuíferos someros localizados favorecen

la producción de azufre fundido y no sólo un aumento en la temperatura. El ascenso de gases magmáticos (CO_2, SO_2, HCl) a altas temperaturas desde una desgasificación profunda y su interacción con acuíferos someros localizados ha producido vapores supercalentados (Fig. 6b). Esta interacción a alta temperatura generó un cracking termal, es decir, el rompimiento de las moléculas de H_2O y la producción anómala de H_2. Estas condiciones fisicoquimicas pudieron generar presiones suficientes para que el azufre contenido en los depositos fumarólicos se funda y se emplace en superficie.

Los análisis químicos y mineralógicos identificaron que los flujos y piscinas no solo se limitan a azufre nativo, si no que tienen otros elementos químicos e incluso pueden formar fases minerales de As-S, las que otorgan las coloraciones rojizas. Además incorporaron fragmentos silicatados en su emplazamiento y desplazamiento, desde los depositos fumarólicos.

REFERENCIAS

Aguilera, F., Tassi, F., Darrah, T., Moune, S., and Vaselli, O. Geochemical model of a magmatic–hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile." B Volcanol 74(1), 119-134 (2012).

Aguilera, F., Layana, S., Rodríguez-Díaz, A., González, C., Cortés, J., and Inostroza, M. Hydrothermal alteration, fumarolic deposits and fluids from Lastarria Volcanic Complex: A multidisciplinary study. Andean Geol 43(2), 166-196 (2016).

Balić-Žunić, T., Garavelli, A., Jakobsson, S.P., Jonasson, K., Katerinopoulos, A., Kyriakopoulos, K. and Acquafredda, P. Fumarolic Minerals: An Overview of Active European Volcanoes, Updates in Volcanology - From Volcano Modelling to Volcano Geology (2016).

Butterfield DA, Nakamura K, Takano B, Lilley MD,Lupton JE, Resing JA, Roe KK .High SO2 flux, sulfur accumulation and gas fractionation at an erupting submarine volcano. Geology 39:803–806 (2011).

Casertano, L. Catalogue of Active Volcanoes of the World, including solfatara fields. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), The Chilean Continent 15 (1963)

Chiodini, G., Marini, L. Hydrothermal gas equilibria: the H2O-H2-CO2-COCH4 system. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 62, 2673 – 2687 (1998).

Giggenbach, W. Relative importance of thermodynamic and kinetic processes in governing the chemical and isotopic composition of carbon gases in high-heat flow sedimentary basins. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 61, 3763 – 3785 (1997).

González-Ferrán, O. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar: 639 p. Santiago (1995).

Delpino, D., Bermúdez, A. Eruptions of pyroclastic sulfur at crater lake of Copahue volcano, Argentina. Newsletter IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 8: 23 (1996).

Lopez, T., Aguilera, F., Tassi, F., Maarten de Moor, J., Bobrowski, N., Aiuppa, A., et al. New insights into the magmatic- hydrothermal system and volatile budget of Lastarria volcano, Chile: Integrated results from the 2014 IAVCEI CCVG 12thVolcanic Gas Workshop. Geosphere, 14(3), 983–1007 (2018).

Martini M. Water and fire: Vulcano island from 1977–1991. Geochem J 27:297–303 (1993).

Naranjo, J. A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. Nature 313(6005), 778-780 (1985).

Naranjo, J. A. Geología del Complejo Volcánico Lastarria, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago (2010).

Pritchard, M., and Simons, M. A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. Nature 418(6894), 167 (2002).

Symonds, R., Gerlach, T., Reed, M. Magmatic gas scrubbing: implications for volcano monitoring. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 108, 303 – 341 (2001).

Tamburello, G., Hansteen, T.H., Bredemeyer, S., Aiuppa, A., Tassi, F. Gas emissions from five volcanoes in northern Chile, and implications for the volatiles budget of the Central Volcanic Zone. Geophys. Res. 41, 4961–4969 (2014).

Tassi, F., Aguilera, F., Vaselli, O., Medina, E., Tedesco, D., Delgado, A., Poreda, R., Kojima, S. The magmatic- and hydrothermal-dominated fumarolic system at the Active Crater of Lascar volcano, northern Chile. Bull. Volcanol. 71, 171–183 (2009).

Tassi, F., F. Aguilera, O. Vaselli, T. Darrah, y E. Medina. Gas discharges from four remote volcanoes in Northern Chile (Putana, Olca, Irruputuncu and Alitar): A geochemical survey, Ann. Geophys., 54(2), 121–136 (2011).

Vaselli, O.; Tassi, F.; Montegrossi, G.; Capaccioni, B.; Giannini, L. Sampling and analysis of fumarolic gases. Acta Vulcanologica 18: 65-76 (2006).

MAPA PROBABILÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA PARA BOLIVIA

Fernández G. A.[a], Nieto M.[a], Griffiths T.[a], Arce W.[a] y Assumpcao M.[b]

[a] *Observatorio San Calixto, La Paz, BOLIVIA*
[b] *Instituto de Astronomía, Geofisica y Ciencias Atmosféricas, Universidad de Sao Paulo, BRASIL*

e-mail: director@osc.org.bo

RESUMEN

El estudio probabilístico de la amenaza sísmica tiene como objeto cuantificar la incertidumbre relacionada a un posible movimiento fuerte del suelo, integrando todas las variables posibles de un determinado espacio geográfico con el fin de conocer la intensidad máxima probable. Diferentes estudios y trabajos previos a este en El Estado Plurinacional de Bolivia trataron de aplicar esta metodología pero no lograron integrar todas las variables, por este motivo el uso de mapas de amenaza sísmica regionales elaborados por entidades extranjeras eran la referencia para distintas construcciones civiles. Nuestro trabajo pudo concatenar y homogenizar todos los catálogos sísmicos locales, regionales e internacionales de forma manual asignando distintos niveles de confiabilidad a las localizaciones de sismos, además formulamos ecuaciones empíricas para obtener una sola magnitud de momento (Mw). En la zonificación sísmica no solo se contemplo la distribución espacial de los sismos, si no también la caracterización geológica de cada zona propuesta, que en total fueron trece para todo el territorio nacional. Se aplicaron procedimientos de máxima verosimilitud para la estimación del parámetro b de Gutenberg – Richter en cada zona sísmica. Con base en la extensa bibliografía de las ecuaciones de predicción de movimientos fuertes, realizamos pruebas con estas y los datos locales para aplicarlas al contexto nacional y obtener de esta manera la máxima aceleración probable para cada zona con base en las tasas de excedencia de 10% y 2% respectivamente, con velocidades de onda de corte de 760m/s.

Palabras Clave: Amenaza Sísmica, *Probabilístico, Bolivia.*

INTRODUCCIÓN

Lamentablemente muchas personas e instituciones en El Estado Plurinacional de Bolivia minimizan la amenaza sísmica en territorio nacional, si bien no es la misma que Chile o Perú, nuestro país si tiene sismicidad en un nivel moderado, sin embargo, existen datos históricos y el contexto geomorfológico crean el escenario ideal para lamentar pérdidas humanas y materiales, más aun con la explosión demográfica que se ha experimentado en los diez años.

La amenaza sísmica probabilista se encarga de estudiar la incertidumbre relacionada a un movimiento fuerte del suelo en alguna región geográfica integrando todas las variables posibles y disponibles para conocer la intensidad máxima probable del suelo.

Nuestra propuesta siguió la metodología de amenaza sísmica propuesta por Cornell (1969), McGuire (1981), Bueval (2013) y Pertersen (2018), pero además incluimos la justificación geológica – estructural para definir la geometría de cada una de las trece zonas propuestas. Si bien contamos con un catálogo sísmico de 107 años, este no es perfecto, la concatenación con otros catálogos y homogenización del mismo fue un gran

 ISBN 978-987-1323-66-1

avance para la institución. Los valores a y b de la relación Gutemberg – Richter fueron obtenidos a través de la metodología propuesta por Kijko and Smit (2012), esta nos permitió trabajar con periodos no completos del catálogo sísmico. Con base en trabajos posteriores de Cotton (2006) y Drouet et al. (2010) elegimos las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte para territorio nacional, este se validó con un árbol lógico que posteriormente junto con la metodología de Ordaz et al. (1991) se obtuvo las aceleraciones máximas probables, pero además de propusimos un estudio sencillo de desagregación

MÉTODOS.

El proceso de subducción entre la placa oceánica de Nazca y la continental de Sudamérica generan la sismicidad en nuestro continente, pero además, en territorio nacional, se evidencia cinco zonas moroftectónicas (figura 1a), estas son Cordillera Occidental (WC) cadena montañosa con picos de más de 6000 m.s.n.m, Altiplano (AP) una meseta amplia y subcidente cuenca sedimentaria terciaria con elevaciones de hasta 5350 m.s.n.m., la Cordillera Oriental (EC) un cinturón plegado de rocas paleozoicas con rumbo NO-SE, el Inter Andino (IA) y Sub Andino (SA) son complejas fajas de montañas plegadas y corridas (Isacks, 1988: Lamb, 1997; Ward et al., 2013).
La sismicidad se distribuye en todas las zonas anteriormente mencionadas, esta se clasifica según la profundidad (figura 1b), sismos corticales con profundidades de hasta 70 km localizados mayormente entre la Cordillera Oriental y Sub Andino. Sismos intermedios con profundidades entre 100 a 350km de profundidad, mayormente se hallan localizados entre la Cordillera Occidental y Altiplano. Sismos profundos con profundidades entre 500 a 700 km localizados entre la parte sur del Sub Andino y parte norte de las planicies Benianas. Finalmente las fuentes lejanas (Norte de Chile o Argentina y Sur de Perú) con magnitudes mayores a 5 son percibidos en territorio nacional (Descotes y Cabre, 1973; Vega, 1996; Vega et al., 2016; Minaya et al., 2014).

La obtención del catálogo sísmico homogenizado fue a través de la concatenación de catálogos locales y regionales (distintos proyectos y de agencias internacionales). La tabla Ia muestra la compilación de información sobre los periodos de tiempo disponibles de distintas fuentes (catálogos sísmicos), la tabla Ib indica la prioridad de uso para cada catálogo sísmico, las figuras 2 ilustra la evolución del catálogo sísmico y los tipos de magnitud que empleamos en el Observatorio San Calixto (OSC).

Es evidente que al concatenar distintos catálogos sísmicos exista la probabilidad de encontrar más de un evento sísmico duplicado, para resolver este problema se trabajó con el algoritmo de Whaterill (2016), que básicamente define una ventana de tiempo en un determinado espacio geográfico, también conocido como espacio de confianza, esta metodología la uso Beuval et al. (2013). Posteriormente se aplicó el algoritmo de Reasemberg (1985) para realizar el "decluster" (desagrupación) de eventos sísmicos pre monitores y replicas (figura 3a y 3b), sin embargo, aún no contábamos con una sola magnitud (Mw). En los catálogos nacionales se aplicaron ecuaciones empíricas de conversión Ml a Mw elaboradas para este trabajo (ver ecuaciones (1) y (2)), la primera es para sismos corticales, la segunda es para sismos de subducción (intermedios).

$$M_w = 0.8021 \cdot M_l + 0.8883 \quad (1)$$

$$M_w = 1.0325 \cdot M_l + 0.0106 \quad (2)$$

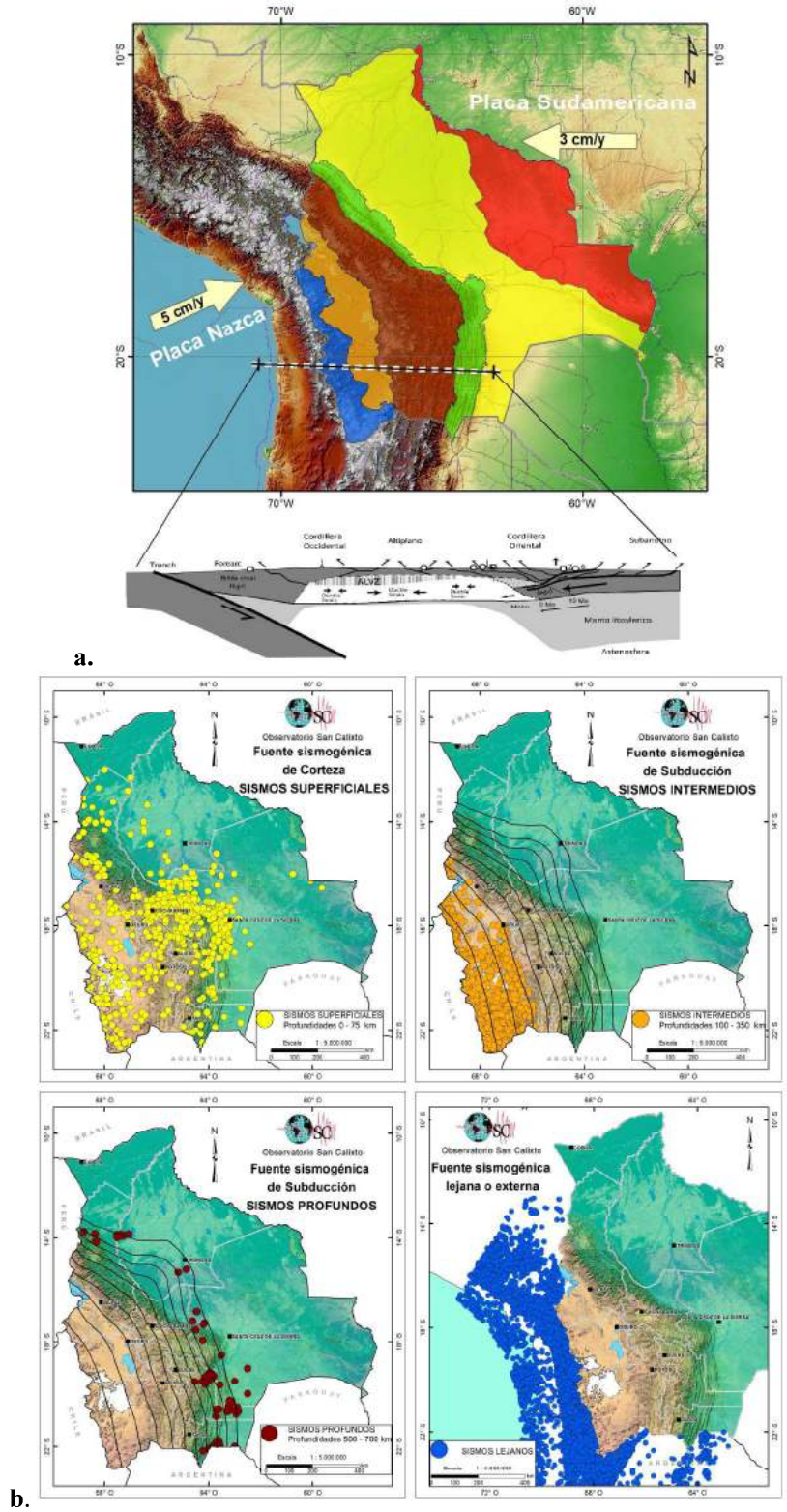


Figura 1. a. Zonas morfotectónicas de Bolivia y la subducción de la plaza de Nazca bajo la Sudamericana. **b.** Distribución de la sismicidad en Bolivia.

Tabla I. a. Periodo del catálogo sísmico y su magnitud de completitud. **b.** Prioridad de aplicación de los catálogos sísmicos.

a.

Catalogo	Periodo	Magnitud de Completitud
OSC 2019	1976 - 2018	3.8
ISC-GEM	1982 - 2012	4.5
CERESIS 95	1471 - 1995	4.0
USGS	2012 - 2018	4.0
Nacionales (Descotes; Cabré; Drake; Vega)	1581 - 1995	7.0

b.

Catalogo	Periodo	Prioridad
OSC 2019	1976 - 2018	1
ISC-GEM	1982 - 2012	2
CERESIS 95	1471 - 1995	3
USGS	2012 - 2018	4
Nacionales (Descotes; Cabré; Drake; Vega)	1581 - 1995	5

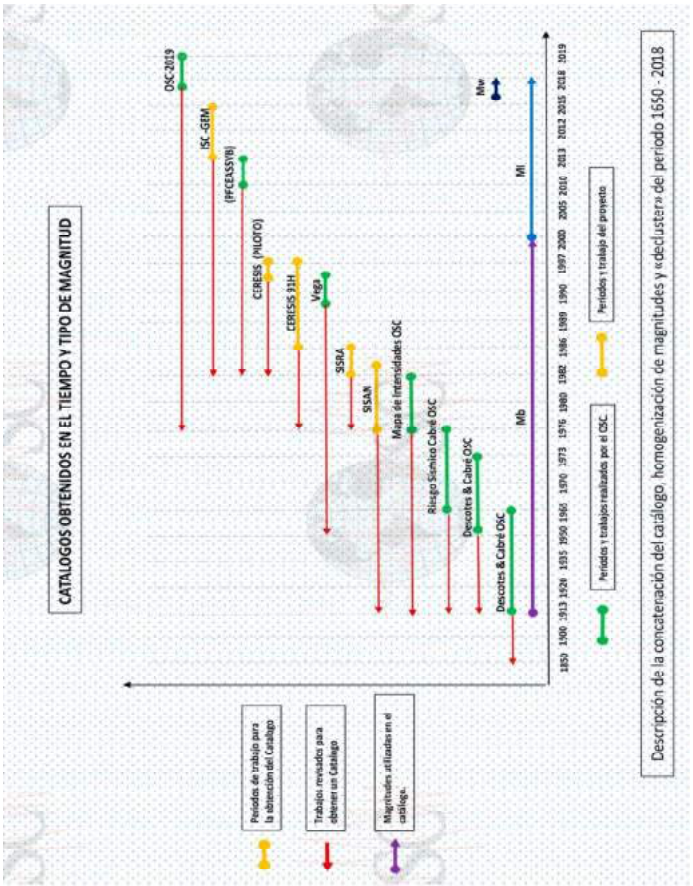


Figura 2. Evolución del catálogo sísmico

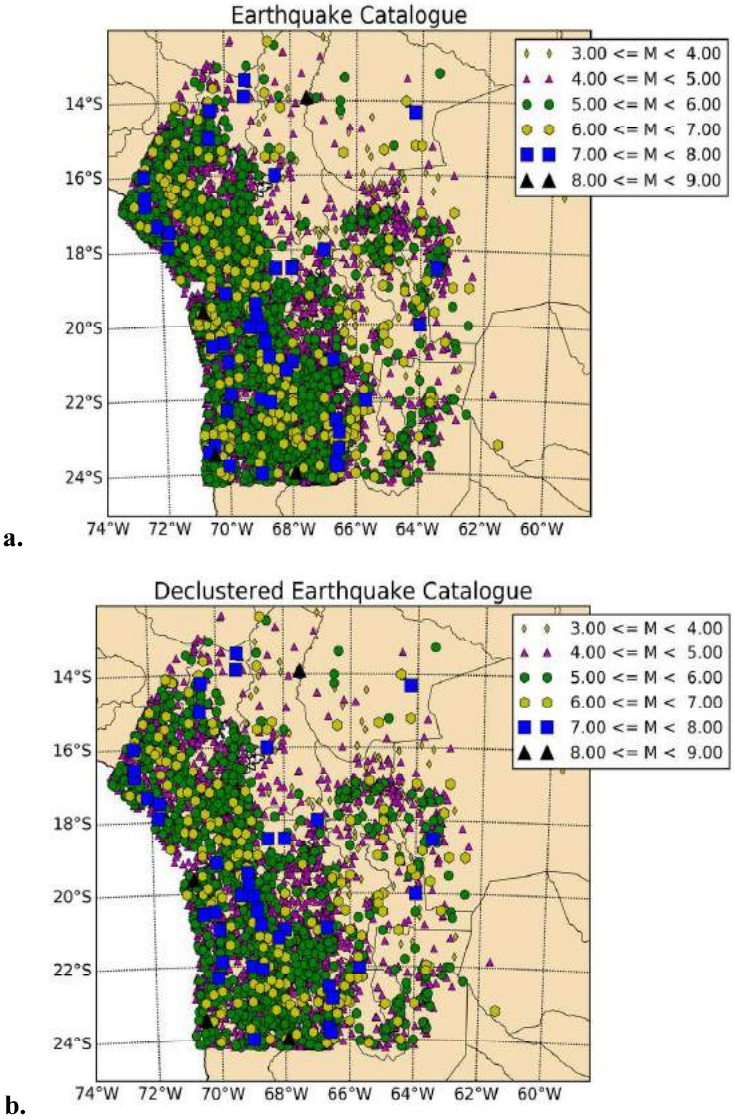


Figura 3. a. Catálogo sísmico homogenizado. **b.** Catálogo sísmico homogenizado y desagrupado (decluster)

Al obtener un catálogo sísmico homogenizado se correlaciono cada epicentro con posibles fallas geológicas potencialmente activas y además con las fuentes sismogénicas anteriormente mencionadas, la distribución espacial de nuestra sismicidad junto con el contexto geomorfotectónico que ampliamente esta explicado en los trabajos de Suarez-Soruco et al. (1983), Assumpcao M. y Araujo (1993), Baby et al. (1992), Anderson et al. (2017) permitieron definir cada zona que en total son trece (figura 4).

No todos los catálogos sísmicos homogenizados son completos en toda su extensión, muchos de ellos presentan poca de información en determinados periodos de tiempo por distintas razones, este es nuestro caso, aplicar el análisis de Gutenberg – Richter para obtener el parámetro *b* en un solo cálculo no es una correcta solución. Sin embargo si dividimos nuestro catálogo sísmico en distintos periodos de tiempo (sub catálogos)

determinando la mínima magnitud de completitud (M_{min}), podremos calcular el parámetro *b* para cada sub catálogo, si se realiza una sumatoria de estos *b* con funciones de máxima verosimilitud obtendremos la estimación β que nos permitirá calcular la tasa de actividad sísmica ($\lambda_{M_{min}}$) , detalles de esta metodología se hallan en el trabajo de Kijko and Smit (2012). De esta manera pudimos calcular las tasas de actividad sísmica y el factor β para nuestro caso.

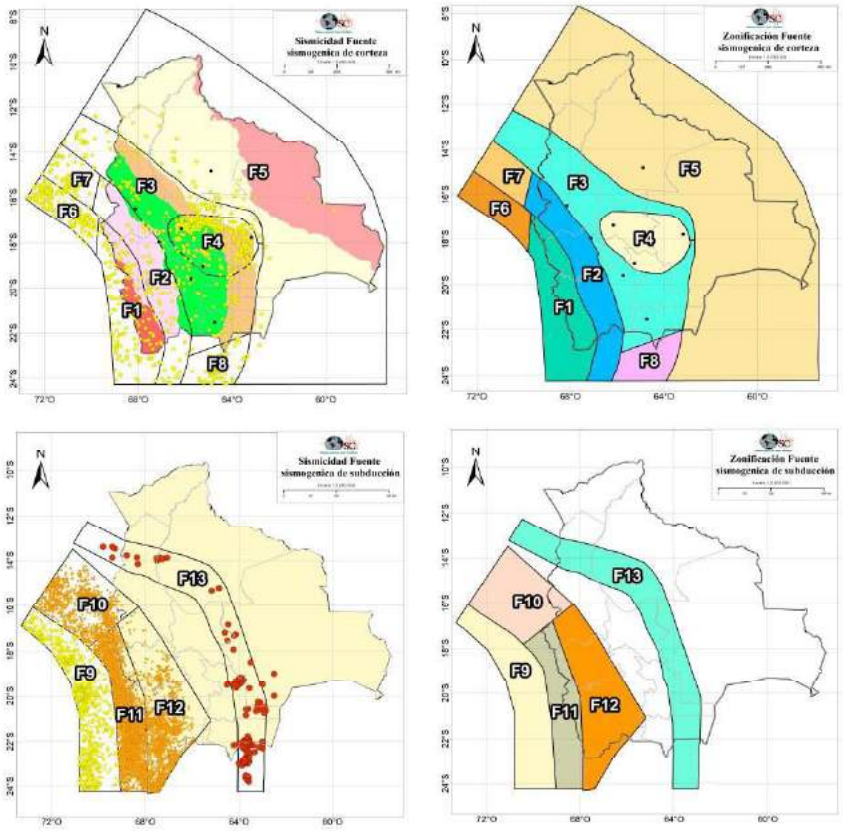


Figura 4. Zonas propuestas para el estudio de amenaza sísmica con base en la distribución espacial de los sismos y los antecedentes geomorfologicos.

Posteriormente la metodología para escoger la ecuación de predicción de movimiento fuerte (GMPE por sus siglas en inglés) fue la propuesta por Cotton et al. (2006) pero además nos apegamos al trabajo de Druet et al. (2017) que básicamente es un estudio estadístico del mejor ajuste de los residuales entre distintas ecuaciones, al no contar con registros de aceleración aplicamos la técnica propuesta por Scherbaum et al. (2009) que aplica las diferencias de distancias estadísticas de Kullback – Lieber (KL). Finalmente con estos datos pudimos elaborar un árbol lógico con base en la teoría de con los resultados que KL nos entregó, es evidente que existe cierta incertidumbre epistémica en este estudio, sin embargo, es posible reducirla con el transcurso del tiempo.

La integración de todas las variables que pudimos obtener hasta este paso son realizadas por la metodología de Ordaz et al. (1991) que básicamente aplica la ecuación 3 ($P(i,t)=\exp[-t \cdot \emptyset(M_{min}) \cdot (1 - F(i)]$) para obtener las aceleraciones máximas probables en las regiones definidas, donde $\emptyset(M_{min})$ es el número de eventos sísmicos de magnitud

superior a M_{min}, F(i) es cantidad de fuentes a evaluar, *t* es el periodo y *P* la probabilidad, la ventaja de este algoritmo es poder incluso modelar las zonas en tres dimensiones y considerar distintas velocidades de onda de corte (V_{s30}), en nuestro caso, solo consideramos una V_{s30} de 760 m/s (suelo roca), para mayor detalle de toda la metodología se puede referir a PSHBO-2019 R.A. No. 1-1211/2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

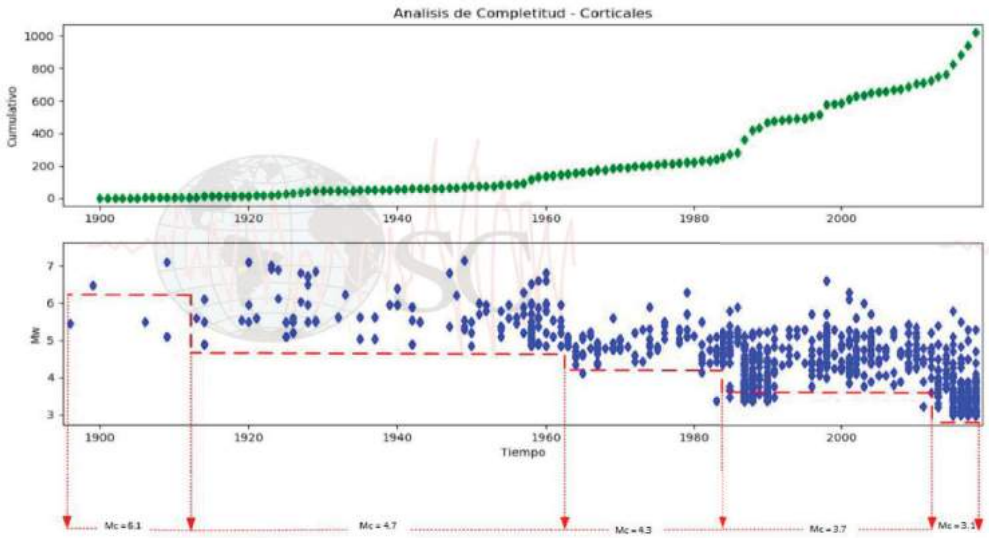
Presentamos a continuación el resultado de la metodología de Kijko and Smit (2012) en las figuras 5a y 5b, estas muestran la división del catálogo sísmico homogenizado en sub catálogos con distintas M_{min}, posteriormente se presenta la tabla II, esta tiene los valores de β y $\lambda_{M_{min}}$ para cada región, pero además proponemos tres distintas magnitudes máximas para la integración de los datos en el algoritmo de Ordaz et al. (1991) y no ser catastróficos y/o minimalistas, el resultado se puede observar en la figura 6a y 6b, estas muestran los mapas probabilísticos de amenaza sísmica para Bolivia con periodos de retorno de 475 y 2475 años respectivamente, las iso curvas de aceleración fueron suavizadas aplicando la máxima verosimilitud y mínima distancia de vecindad en términos de bits con herramientas de procesamiento para información geográfica, la tabla III presenta las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte para las zonas corticales y de subducción que presentaron residuos bajos KL, posteriormente la figura 7 presenta el árbol lógico para este trabajo.

Tabla II. Resultados del análisis por zonas propuestas aplicando la metodología de Kijko and Smit (2012).

	FUENTE	M min (M0)	Lambda (M0)	Beta	M máx. 1	M máx. 2	M máx. 3
FUENTES ASOCIADAS A DEFORMACIÓN CORTICAL	F1 - Zona Occidental	4,5	8,372	2,705	7	7,5	8
	F2 - Zona Altiplánica	4,5	3,022	2,43	6	6,5	7
	F3 - Zona Oriental	4,5	0,65	2,43	7	7,5	8
	F4 - Zona Boomerang	4,5	4,128	2,486	7	7,5	8
	F5 - Zona cratónica	4,5	0,1585	1,271	7	7,5	8
	F6 - Zona Occidental peruana	4,5	7,32	3,2324	8	8,5	9
	F7- Zona altiplano peruano	4,5	0,721	2,697	7	7,5	8
	F8 - Zona cordillera Argentina	4,5	2,687	3,568	7	7,5	8
FUENTES ASOCIADAS AL PROCESO DE SUBDUCCIÓN	F9 - Zona interplaca	4,5	8,393	2,758	9	9,5	10
	F10- Zona intraplaca intermedia	4,5	8,67	2,172	7,5	8	8,5
	F11- Zona intraplaca intermedia	4,5	41,39	2,169	8	8,5	9
	F12- Zona intraplaca intermedia	4,5	12,568	2,478	7,7	8	8,5
	F13- Zona intraplaca profunda	4,5	1,549	1,256	8,5	9	9,5

 ISBN 978-987-1323-66-1

a.



b.

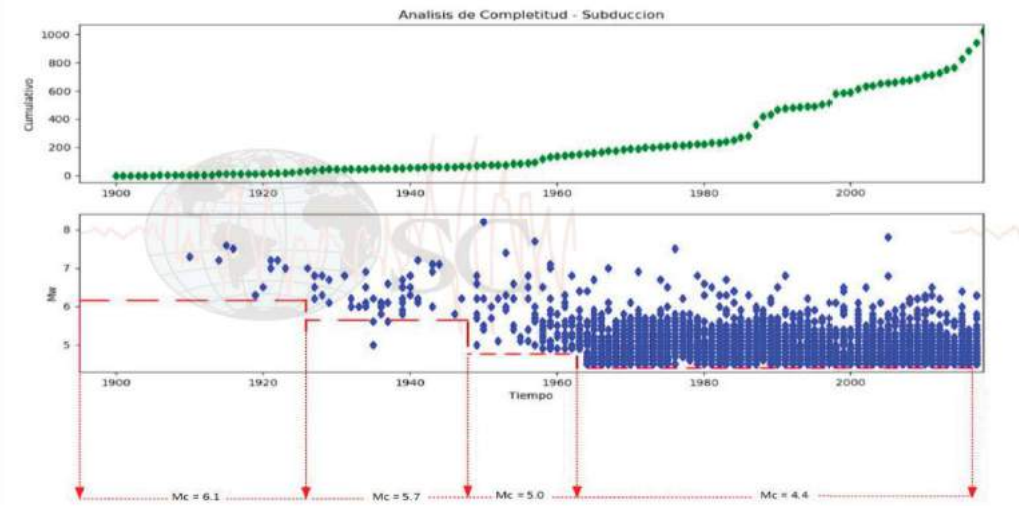
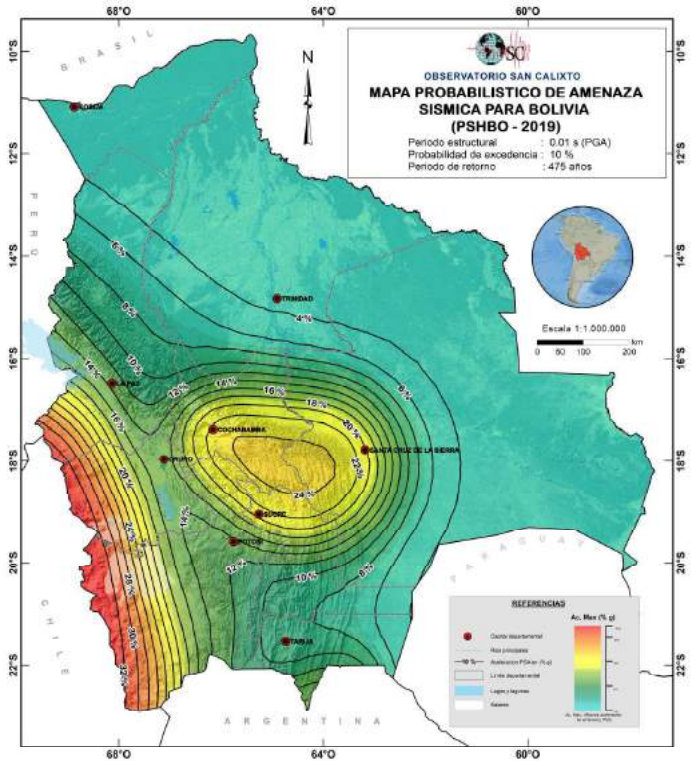


Figura 5. a. División del catálogo sísmico para sismos corticales. **b.** División del catálogo sísmico para sismos intermedios.

Tabla III. Ecuaciones de predicción de movimiento fuerte para el presente trabajo.

Zonas asociadas al proceso de deformación cortical	Zonas asociadas a la subduccion
Abrahamson *et al.*, 2014.	BCHydro 2016 (Abrahamson *et al.*, 2016).
Boore *et al.*, 2008.	Montalva *et al.*, 2017
Boore *et al.*, 2014.	Youngs *et al.*, 1997

a.



b.

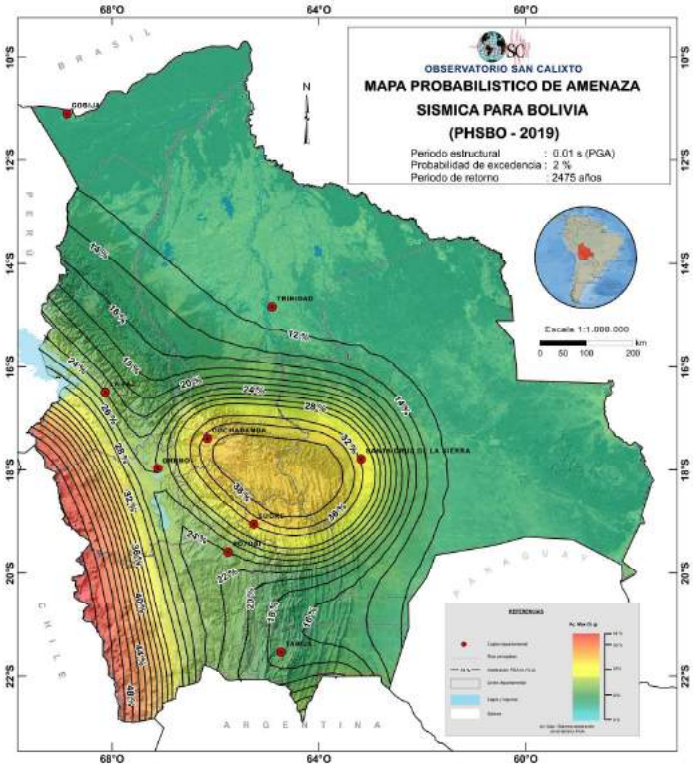


Figura 5. a. Mapa probabilístico de amenaza sísmica para Bolivia (475 años). **b.** Mapa probabilístico de amenaza sísmica para Bolivia (2475 años).

Es evidente que si existe la amenaza sísmica en territorio nacional, a pesar que no sucedan sismos de magnitudes elevadas constante como en Chile o Perú. Por la distribución espacial de los sismos corticales y la integración de todas las variables para estas zonas se obtuvo que la aceleración máxima probable estaría entre 22% a 24% de la gravedad estas se hallan distribuidas entre los departamentos de Cochabamba, Santa Cruz y Chuquisaca. Las zonas de subducción presentan aceleraciones máximas probables de hasta 32% de la gravedad, están localizadas en la frontera con Chile y la parte sur occidental de la Cordillera Occidental, en esta región existen las cadenas de volcanes del complejo andino sur, para La Paz, Oruro y Potosi las aceleraciones están en el rango de 10% a 16% de la gravedad, estas ciudades también son afectadas por la sismicidad de fuente lejana. Al sur del territorio nacional encontramos que Tarija puede experimentar aceleraciones de hasta 10% de la gravedad, se tomaron en cuenta los sismos de fuentes lejanas del Norte de Argentina. Las aceleraciones más bajas están entre los departamentos de Pando y Beni, estos podrían experimentar hasta un 8% de la gravedad, sin embargo no son de menor importancia debido a que el suelo es poco consolidado y podría generar efecto de sitio.

CONCLUSIONES

La amenaza sísmica en el Estado Plurinacional de Bolivia es moderada, pero debe ser tomada en cuenta por todos los tomadores de decisiones en caso de planificar proyectos futuros ya sean complejos habitacionales urbanos o centrales nucleares. Si bien no contamos con registros de aceleración hasta el momento, este trabajo propone el uso de este mapa y sus aceleraciones máximas probables (tanto en 475 como 2475 años) para poder iniciar el estudio de estructuras sismo resistentes.

Por falta de información sobre el tipo de suelos se trabajó con la velocidad de onda de corte de 760 m/s, esta es para roca, esperamos que mayores investigaciones de otros institutos y/o desarrollos en nuestra institución faciliten la clasificación de los suelos y de esta manera poder integrar los mismos a nuestras integrales de riesgo y poder obtener los valores máximos probables de aceleración.

Sin el ánimo de ser catastrófico o muy conservador proponemos estos mapas sean incluido en la normativa boliviana del diseño sismo resisten, nuestro trabajo refleja toda la información disponible en estudios geofísicos y de sismología a los largo de la vida de la institución.

REFERENCIAS

Cornell , C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969). The major influences on seismic risk. Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago.

Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J., & Bungum, H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central europe and rock sites. Journal of Seismology, 137-156.

Descotes, P. M., & Cabre, R. (1973). Historia sísmica de Bolivia. Geofísica Panamericana., 251-278.

Drouet, S., Montalva, G., Dimate, C., Castillo, L., Fernandez, G. A., Morales, C., . . . Weatherill, G. (2017). Building a ground-motion logic tree for south america within the gem-sara project framework. 16th World Conference on Earthquake Engineering.

Isacks, B. L. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. J. Geoph. Res., 3211-3231.
Kijko, A., & Smit, A. (2012). Extension of the aki-utsu b-value estimator for incomplete catalogs. Bulletin of the Seismological Society of America, 1283–12871.
McGuire, R. K., & Shedlock, K. M. (1981). Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States. Bull. Seism. Soc. Am., 1287-1308.
Minaya, E. (2014). Historia de 137 años de silencio. Boletín Especial Observatorio San Calixto.
Ordaz, M. (1991). Brief description of program CRISIS, Internal report, Institute of Solid Earth Physics. Bergen: University of Bergen, Norway.
Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., . . . Shumway, A. M. (2018). Seismic, hazard, risk and design for south america. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(2), 108-800.
Reasenberg, P. A. (1985). Second-order moment of central California seismicity. Journal of Geophysical Research, 90(B7), 5479–5495.
Scherbaum, Frank & Delavaud, Elise & Riggelsen, Carsten. (2009). Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA. 99. 3234-3247. 10.1785/0120080347.
Steward , J., Douglas , J., Boore , D., Campbell, K., Delavaud, E., Erdik , M., & Stafford , P. (2015). Selection of a global set of ground motion prediction equations: work undertaken as part of Task 3 of the GEM-PEER Global GMPEs project. PEER Report 2012. Pacific Earthquake Research Centre.
Suarez-Soruco, R. (1986). The Carboniferous System of Bolivia: a brief summary. ANNUAL MEETING OF WORKING GROUP OF PROJECT No 211 lGCP-IUGS (Late Paleozoic of South America) (págs. 11-26). Cordoba: JUGS.
Vega, A., Griffiths, T., Nieto , M., Condori, F., & Fernandez, G. (2016). Mapa de intensidades máximas probables de Bolivia. La Paz: Observatorio San Calixto.
Vega, B. A. (1996). Complementos a la historia sísmica de Bolivia. Revista Geofísica. (IPGH)(45), 73-124.
Ward, K. M., Porter , R. C., Zandt , G., Beck, S., Wagner, S. L., Minaya, E., & Tavera, H. (2013). Ambient noise tomography across the Central Andes. Geophysical Journal International, 194(3-1), 1559–1573.

PERSPECTIVAS SOBRE AMÍLCAR O. HERRERA EN EL CENTENARIO DE SU NACIMIENTO: GEOCIENCIAS, "MODELO MUNDIAL LATINOAMERICANO" Y COMPROMISO HUMANISTA

Fernández Guillermet A.[abde]

[a]*Centro Atómico Bariloche, CNEA, ARGENTINA*
[b]*Instituto Balseiro, CNEA-Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[c]*Grupo de Estudios Interdisciplinarios, Facultad de CEyN, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[d]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*
[e]*Fundación Bariloche, ARGENTINA*

e-mail: a.f.guillermet@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo ofrece una sinopsis cronológico-conceptual de la trayectoria de Amílcar Oscar Herrera. Incluye su actividad científica en el campo de la Geología, los recursos minerales, y en el estudio de las relaciones entre ciencias, tecnologías y desarrollo de América Latina. En particular, se analiza el proyecto que, bajo su dirección, resultó en la formulación del denominado "Modelo Mundial Latinoamericano". El trabajo culmina con una referencia a su actividad en el Instituto de Geociencias que fundó en la Universidad de Campinas (Brasil) y al contenido filosófico-humanista de sus últimas reflexiones.

Palabras Clave: Amílcar O. Herrera, Ciencia, tecnología y desarrollo, Modelo Mundial Latinoamericano, Fundación Bariloche, Instituto de Geociencias de Campinas.

INTRODUCCIÓN

Amílcar Oscar Herrera nació en Caseros (Prov. de Buenos Aires) el 23/10/1920 y realizó estudios secundarios en la Ciudad de Buenos Aires. A fines de diciembre de 1947 completó su Licenciatura en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEN-UBA) con la orientación Geología, la cual había sido creada en 1938 a instancias de Horacio J. Harrington (Ramos, V.A., 2018). A mediados de 1947 se había incorporado al Banco de Crédito Industrial Argentino (BCIA), el cual contaba entonces con un sector dedicado al fomento de la minería (Rougier, M.N., 1999). Entre otros estudios para el BCIA, analizó entre 1947 y 1948 la cuenca ferrífera de Sierra Grande (Prov. de Río Negro), esclareciendo su origen sedimentario y evaluando su potencial (Ramos, V., 2016). Sobre esta base y con la dirección del Dr. Harrington, quien fuera el primer director del Instituto de Geología de la FCEN-UBA, presentó en 1950 una Tesis de doctorado. Durante 1950 y 1951 realizó estudios de posgrado en la Colorado School of Mines (USA), donde obtuvo el título de Master of Science en Geología Económica (Herrera, A.O., 1951), convirtiéndose en uno de los primeros graduados argentinos en el área (Ramos, V., 2016). A partir de su regreso a Argentina, inició una intensa actividad universitaria y científica que se inició en el área de Geología y recursos minerales, pero se amplió al estudio de las relaciones ciencia-tecnología-sociedad-ambiente (CTSA).

Contribuyendo a la conmemoración de los 100 años del nacimiento de Amílcar Herrera, se ofrece en este trabajo una sinopsis cronológico-conceptual de la trayectoria de este destacado científico e intelectual latinoamericano. A continuación se abordan, en primer lugar, las investigaciones y actividades docentes en Geología y minería que desarrolló en Argentina y en Chile. Seguidamente se analizan sus primeros estudios sobre la problemática CTSA en América Latina (AL) y el proyecto de construcción del "Modelo Latinoamericano del Mundo". Finalmente, se considera la actividad en las dos últimas décadas de su vida y se presentan las conclusiones.

DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN GEOLOGÍA Y MINERÍA

Incorporación al plantel de la FCEN-UBA

Invitado en 1952 por Horacio J. Harrington y por Armando F. Leanza, Herrera dictó en la FCEN-UBA la asignatura Geología Económica, iniciando así la enseñanza universitaria de esta disciplina en Argentina (Ramos, V., 2016). En 1953 dictó el curso también en la Universidad Nacional de La Plata. Los concursos regulares sustanciados en la FCEN-UBA en la segunda mitad de la década de 1950 permitieron incorporar docentes con dedicación exclusiva, para enseñar disciplinas poco desarrolladas en el país (Ramos, V.A., 2016). En ese marco, Herrera fue designado en 1957 Profesor Titular de la asignatura Geología Económica, la cual integraba el nuevo plan de estudios (IDEAN, 2016) que había impulsado el director del Departamento del área, el Dr. Félix González Bonorino (Ramos, V.A., 2016). Entre 1959 y 1962 Herrera integró el Consejo Directivo de la FCEN-UBA y la Comisión de Enseñanza, colaboró en el desarrollo del Curso de Ingreso y la implementación de la carrera del doctorado. También participó en debates sobre, entre otros temas, los concursos docentes, la interrelación entre docencia e investigación, y la intervención del Instituto de Microbiología Malbrán que condujo a la renuncia del jefe de la División Biología Molecular, Dr. César Milstein (Tobal, J., 2016).

Actividades en Geología y estudios de los recursos minerales

En la FCEN-UBA dictó cursos, realizó extensos estudios sobre la génesis y estructura de diversos distritos de pegmatitas (Ramos, V., 2016) y dirigió las Tesis doctorales de Horacio García Campra, Herbert Korten y Rogelio Clayton (IDEAN, 2016). De esta manera contribuyó a la formación de los primeros geólogos mineros de Argentina (Ramos, V., 2016). En septiembre de 1964 participó en la fundación del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGM), integrando el Consejo Asesor (Lavandaio, E. y Catalano, E., 2004) que acompañó al primer presidente, el Dr. González Bonorino (Ramos, V., 2016). La labor realizada en el INGM contribuyó a la planificación e inventario de los recursos mineros nacionales. En 1965 publicó su libro "Los Recursos Minerales de América Latina", el cual tenía por base una investigación realizada en Chile en 1962 para la Comisión Económica para América Latina (Herrera, A., 2015). El libro reflejó su preocupación por el aprovechamiento racional de los recursos de AL y adelantó ideas que permearían toda su obra (Tobal, J., 2016).

Los años en la Universidad de Chile

La actividad universitaria y científica en la FCEN-UBA se vio abruptamente interrumpida por el violento incidente del 29/07/66, conocido como la "Noche de los Bastones Largos", el cual tuvo lugar en el marco de la dictadura instaurada el 28/06/1966. Dicho incidente provocó en la UBA más de 1300 renuncias (Unzué, M.,

2020) y unas 300 emigraciones. Herrera renunció a su cargo en la FCEN-UBA y en el directorio del INGM (Lavandaio, E. y Catalano, E., 2004) y, como hicieron unos 70 académicos, emigró a Chile (Aceituno, P., 2018). Allí se integró al recientemente creado Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM-UCHILE) (Aceituno, P., 2018), (Charrier et al, 2018). Además de enseñar Geología Económica, en 1968 publicó en la revista Economic Geology un extenso trabajo sobre la génesis y estructura de las pegmatitas en Argentina (Herrera, A.O., 1968a).

El 21/02/1969 el gobierno de Eduardo Frei resolvió que 14 de los 27 profesores argentinos que trabajaban en la FCFM-UCHILE debían abandonar el país en un plazo de 72 horas, o serían expulsados (Borches, C., 2016), (Aceituno, P., 2018). Aunque el motivo de esta decisión nunca se explicitó, se habría debido a una combinación de celos académicos, disputas políticas y temores de las autoridades (Borches, C., 2016). Además, Amílcar Herrera había sido acusado de adquirir subrepticiamente información estratégica sobre la minería chilena (Charrier et al, 2018). En rechazo a la decisión oficial, varios profesores argentinos junto a miembros de la comunidad universitaria, ocuparon la sede de la Facultad de Ciencias y Artes Musicales. Sin embargo, ante la amenaza de intervención por parte de los carabineros que habían rodeado el edificio, los profesores argentinos acordaron dejar el país antes del 08/03/1969. A causa de este incidente, la gran mayoría de los docentes argentinos abandonaron Chile (Ramos, V., 2016), (Aceituno, P., 2018).

ESTUDIOS EN EL ÁREA CIENCIA-TECNOLOGÍA-DESARROLLO

Actividades a partir de 1968

Además de sus actividades en la FCFM, Herrera se desempeñó como Profesor Asociado en el Instituto de Estudios Internacionales de la UCHILE (Charrier et al, 2018). En la revista de dicho Instituto publicó en 1968 el artículo "La ciencia en el desarrollo de América Latina" (Herrera, A.O., 1968b), el cual constituyó posteriormente la introducción a un libro editado en Chile, que reunía contribuciones de Víctor L. Urquidi, Jorge Sabato, Darcy Ribeiro, Marcos Kaplan y otros destacados autores latinoamericanos (Herrera, A.O., 1970). En 1971 se editó el libro "Ciencia y Política en América Latina" (Herrera, A.O., 1971), el cual fue considerado por (Sabato, J.A., 1975) como uno de los mejores publicados en castellano sobre esta temática.

Ya de regreso en Argentina, Herrera se incorporó a la Fundación Bariloche (FB), institución que él había contribuido a crear (Feld, A., 2011), donde desarrolló una intensa actividad de investigación y de gestión (Mallmann, C., 1995). Allí dirigió el proyecto de formulación de un modelo mundial, el cual se analiza más adelante en este trabajo. En 1973 publicó estudios sobre los determinantes sociales de la política científica en América Latina (Herrera, A.O., 1973a) y la importancia cultural y socio-política de la creación local de tecnología (Herrera, A.O., 1973b).

El "atraso" científico-tecnológico y el subdesarrollo latinoamericano

Un tema común a los primeros artículos y al libro de 1971 es lo que Herrera denominaba el "atraso" científico y tecnológico (C&T) de AL. Para el autor, más que el volumen o la calidad de la investigación y desarrollo (I+D) que se realizaba en la región, lo preocupante era su orientación. En particular, observó: (i) la falta de estudios en el área de los recursos naturales y de investigaciones sobre su utilización industrial; (ii) la inexistencia de investigación tecnológica en las empresas; y, (iii) la focalización

de la investigación básica en temáticas desvinculadas de las necesidades de la industria o del crecimiento económico de la región. Para Herrera, esta desvinculación entre la actividad de I+D y las demandas socioeconómicas era el carácter distintivo del subdesarrollo latinoamericano en el campo C&T, un diagnóstico coincidente con el que formularon en 1968 Sabato y Botana (Sabato, J.A., 1975) y otros autores (Arellano Hernández et al, 2012).

En busca de causas del "atraso", Herrera analizó críticamente diversas explicaciones propuestas en esos años, en particular, la que alude a defectos organizativos, ineficiencia o a la falta de una política científica, pero propuso una explicación alternativa, vinculada con la estructura socioeconómica de AL (Sito, N., 1971/1972). A tal fin, el autor distinguió entre política científica "explícita" y política científica "implícita". La primera es la "política oficial": el cuerpo de disposiciones y normas que se reconocen comúnmente como la política científica de un país. La segunda, es la que determina realmente el papel de la ciencia en la sociedad porque expresa la demanda hacia el sector C&T del "proyecto nacional" vigente. Este último fue definido por Herrera como el conjunto de objetivos al que aspiran los sectores sociales que tienen, directa o indirectamente, el control económico y político: son los objetivos concretos concebidos por una élite dirigente con poder apto para articularlos e implementarlos.

Proyectos nacionales e industrialización en América Latina

Para el autor, los proyectos nacionales en la mayoría de países de AL se originaron en el período inmediato poscolonial, cuando se consolidó su inserción en el sistema internacional como economías periféricas. Entre la independencia y la Primera Guerra Mundial, el crecimiento económico dependió esencialmente de la producción de materias primas para la exportación, impulsada por la inversión extranjera. En esa etapa, el sistema productivo se expandió más por explotación extensiva de los recursos naturales y de la mano de obra que por las innovaciones tecnológicas. El sector manufacturero, que estaba abocado a una industrialización muy primaria, tuvo un escaso desarrollo, porque los recursos provenientes del sector exportador permitieron importar los productos manufacturados de los países industrializados. De esta manera, los proyectos nacionales originales casi no plantearon demandas al sector C&T local. Los cambios en la situación internacional que tuvieron lugar a comienzos del siglo XX afectaron profundamente la viabilidad de tales modelos de desarrollo. A partir de la Primera Guerra se inició un proceso de industrialización con el reemplazo de las manufacturas más fáciles de producir, incorporando tecnologías provenientes de los países desarrollados o con técnicas que requirieron poca o ninguna investigación. A diferencia de lo que ocurrió en Europa durante la Revolución Industrial, el proceso de industrialización por sustitución de importaciones (ISI) en AL, motorizado por acontecimientos externos, no fue acompañado de una burguesía industrial ascendente o la creación de una cultura industrial alternativa a la de las clases superiores. En realidad, en AL la ISI dio origen a empresariado que, según Marcos Kaplan (citado por Herrera, A.O., 1968b), se caracterizaba por sus escasas posibilidades de competitividad y capitalización y por preferir las actividades mercantiles, especulativas y el consumo a las grandes inversiones tecnológicas y productivas. Además, las clases altas, propietarias de la tierra y conectadas al sector exportador, no tenían interés en apoyar los procesos de modernización de la economía. Por su parte, las clases medias, cuyo ascenso fue contemporáneo del proceso de industrialización, llegaron al poder político con partidos políticos urbanos, liberales, partidarios del comercio libre y no

industrialistas, sin haber elaborado un proyecto nacional alternativo al vigente. En consecuencia, los viejos grupos dominantes siguieron fijando las pautas básicas de la conducción nacional. Por formación cultural y por el concepto de lo que consideraba sus propios intereses, esta élite dominante no tuvo ni la aptitud ni la voluntad necesarias para impulsar la creación de un sistema C&T eficiente.

En síntesis, para Herrera la persistencia en los grupos dirigentes de la vieja concepción del papel de la ciencia en el desarrollo de AL y la desconfianza hacia todo posible elemento de cambio, son los obstáculos principales que dificultaron el adelanto C&T al iniciarse la modificación de los proyectos nacionales. Además, el Estado de los países latinoamericanos heredó y continuó una tradición liberal que concibió su intervencionismo como anormal y transitorio y lo incapacitó para canalizar la energía creadora de los pueblos hacia objetivos nacionales propios. En particular, se concentró en responder a las situaciones impuestas por las circunstancias externas, pero desatendió el quehacer C&T creador, reduciendo su acción en el campo cultural al apoyo a la educación y al fomento de las profesiones (medicina, derecho, ingeniería) necesarias para el funcionamiento de una sociedad esencialmente estática.

De esta manera, las falencias del Estado y la falta de una industria tecnológicamente progresista hicieron que el proceso de ISI conllevara un escaso volumen de investigación científica y desconectada de los problemas de la región. En etapas posteriores, el deterioro continuo de la situación económica y social mostró que, a pesar de las modificaciones introducidas, los viejos proyectos nacionales habían llegado al límite de sus posibilidades. En este marco, observó Herrera, la persistencia del statu quo a pesar de la presión social en favor de cambios reales en el sistema, condujo en el campo C&T a serias contradicciones entre las políticas explícita e implícita.

Superación del "atraso": el desarrollo como proceso social

A este escenario regional de estancamiento socioeconómico y "atraso" C&T, Herrera opuso un ideal de desarrollo como un proceso de cambio social más amplio y profundo que, como planteaba (Sunkel, O., 1967): (a) persigue como finalidad última la igualación de oportunidades sociales, políticas y económicas, en el plano nacional y en relación con sociedades con patrones más elevados de bienestar material; y, (b) implica la búsqueda en la propia realidad de AL de los proyectos nacionales y las formas de organización adecuadas. Así concebido, el proceso de desarrollo sólo puede llevarse adelante si se ponen en juego todas las energías y capacidades intelectuales de un pueblo. Por tal razón los países de AL no pueden renunciar al cultivo de la ciencia y la tecnología, que son manifestaciones básicas de la voluntad creadora de una sociedad (Herrera, A.O., 1973b).

Consecuentemente, Herrera planteó la necesidad de impulsar un desarrollo C&T de alto nivel, porque: (i) las fuerzas de cambio de una sociedad no se generan nunca simultáneamente en todos los sectores, y el adelanto relativo en uno de ellos puede estimular el de los otros; y, (ii) la concepción y puesta en marcha de una política de desarrollo C&T es una tarea larga y difícil que requiere tiempo. A tal fin propuso un esquema de acción con tres etapas: (1º) determinación de los problemas y las necesidades nacionales en un orden de prioridades concordante con la estrategia de desarrollo; (2º) formulación de las necesidades de orden económico y social en términos técnicos, transformando los problemas en objetivos concretos de investigación; y, (3º) implementación de los resultados de las investigaciones al sistema económico activo. Finalmente, el autor enfatizó que: (A) una estrategia con estas características sólo puede

hacerse con participación activa de científicos en los organismos encargados de la planificación del desarrollo; (B) la integración latinoamericana ofrece posibilidades para incrementar la capacidad del sector C&T de los países de la región; y, (C) la misma puede comenzar con proyectos tales como centros de perfeccionamiento o proyectos de investigación relacionados con planes multinacionales de desarrollo.

ELABORACIÓN DEL "MODELO MUNDIAL LATINOAMERICANO"

Antecedentes internacionales

Las motivaciones de este proyecto se remontan a las iniciativas del Club de Roma (CdR), una asociación internacional constituida por una treintena de científicos, educadores, economistas, industriales y funcionarios convocados en abril de 1968 por el industrial italiano Aurelio Peccei y el científico escocés Alexander King para analizar los problemas que afectaban el presente y el futuro de la humanidad (Barbieri Masini, E., 2006). En una reunión del CdR realizada en Berna (Suiza) en junio de 1970, Jay W. Forrester, experto en dinámica de sistemas del Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Bloomfield, B.P., 1984), planteó la posibilidad de utilizar dichas técnicas computacionales para tratar la problemática global (Tamames, R., 1974) (Peccei, A., 1982). Forrester elaboró un primer esquema socioeconómico del mundo que llamó World1 y luego la versión final, denominada World2, que presentó al CdR en julio de 1970 y documentó en el libro "World Dynamics" (Forrester, J.W., 1971). Posteriormente, un equipo liderado por Dennis L. Meadows del MIT expandió el World2 y lo vinculó más estrechamente a la información empírica. El modelo computacional resultante, denominado World3 (Meadows et al, 1973), relacionaba los subsistemas población, producción agrícola, recursos naturales, producción industrial y contaminación.

Las proyecciones del World3, presentadas en 1972 en el libro "Los límites al crecimiento" (Meadows et al, 1972), indicaban esencialmente que: (i) la acción conjunta del aumento poblacional y el consumo presionaría sobre los recursos naturales y el ecosistema hasta provocar una catastrófica detención; y, (ii) sólo el control de la natalidad y la paralización del crecimiento económico podrían llevar a un estado de equilibrio. Dichos resultados tenían serias implicancias para los países subdesarrollados: al congelarse el crecimiento económico, éstos perdería la posibilidad que tenían, al menos en principio (Furtado, C., 1974), de superar la pobreza y escasez que los afectaban (Urquidi, V., 1972).

La respuesta latinoamericana al World3

En junio de 1971, en una reunión sobre el World3 organizada en Brasil por el CdR y el Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro (IUPERJ), la mayoría de los invitados latinoamericanos cuestionaron dicho modelo (Herrera, A.O., 1972) (Meadows et al, 1982). Las principales críticas al World3, considerado de carácter "neo-malthusiano", eran las siguientes (Meadows et al, 1982), (Gallopín, G.C., 2001), (Díaz, L., 2016): (i) el modelo se presentaba como objetivo y libre de valores, pero partía en realidad de una cosmovisión fundada en la aceptación del status quo, lo cual implicaba que la mayor parte de la población mundial permanecería en un estado de miseria y pobreza; (ii) el World3 tampoco tenía en cuenta los cambios causados por las dinámicas políticas y las enormes desigualdades entre países o regiones (Furtado, C., 1974), lo cual era una seria deficiencia para un modelo que se presentaba como una herramienta para la toma de decisiones; y, (iii) el modelo presentaba fallas al estimar las

reservas de recursos naturales, y una gran sensibilidad a pequeñas variaciones simultáneas de los parámetros involucrados.
En la citada reunión realizada en Brasil, un grupo de latinoamericanos le encomendó a la FB la construcción de un nuevo modelo, teniendo en cuenta las objeciones allí planteadas. El proyecto preliminar, que contemplaba la participación de especialistas de la región, se presentó en octubre de 1971 al Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO) reunido en Buenos Aires. En diciembre de ese año un Comité integrado por Amílcar Herrera, Carlos Mallmann, Enrique Oteiza, Jorge Sabato, Helio Jaguaribe, Osvaldo Sunkel, Víctor L. Urquidi y J.A. Silva Michelena, presentó el plan de trabajo (Herrera, A.O., 1972) (Meadows et al, 1982).
En 1972, un equipo multidisciplinario que incluía especialistas de la FB y también externos, a Amílcar Herrera como director y al Dr. Hugo Scolnik como director alterno, inició la elaboración de lo que se denominaría el "Modelo Mundial Latinoamericano" (MML) o "Modelo Bariloche". Una descripción temprana del proyecto fue publicada por (Herrera, A.O., 1972), y Scolnik, quien visitó el MIT en marzo de 1972 (Scolnik, H.D., 2018), publicó una crítica metodológica al World3 (Scolnik, H.D., 1973). La vinculación inicial del proyecto con el CdR fue objeto de las críticas de (Varsavsky, O., 1972), las cuales fueron respondidas por (Herrera, A.O., 1972) y (Sabato, J.A., 1972).

Características del Modelo Bariloche

Las premisas fundamentales en las que se basaba el MML eran las siguientes (FB, 1978) (Meadows et al, 1982), (Díaz, L., 2016): (i) en lugar de un futuro catastrófico, como predecía el World3, se considera que el mundo se encuentra ya en una situación tal, producto de distintas calamidades como la miseria, el hambre o el analfabetismo que afecta a gran parte de la población, especialmente en los países subdesarrollados, y que es necesario corregir esa situación; (ii) dichos países no pueden progresar copiando las pautas seguidas por los países desarrollados, por imposibilidad histórica y porque no es deseable copiar su sistema de valores; (iii) el uso devastador e irracional de los recursos naturales, y el deterioro del medio ambiente son el resultado de un sistema de valores destructivo; (iv) las políticas de preservación del ecosistema o de reducción del consumo de recursos naturales son difíciles de implementar mientras todos los seres humanos no alcancen un nivel de vida aceptable; y, (v) es necesario que los sectores privilegiados de la humanidad disminuyan su tasa de crecimiento económico para aliviar la presión sobre los recursos naturales.
En realidad, en lugar predecir qué ocurriría si continuasen las tendencias socioeconómicas vigentes, tal como hacía el World3, el MML aclaraba explícitamente (Hughes, B.B., 1985) que se proponía explorar la posibilidad material de alcanzar como meta final un mundo liberado de la miseria y el atraso (Meadows et al, 1982). Por tal razón, el MML es un "modelo" en dos sentidos: un proyecto de sociedad (Hughes, B.B, 1985) y un instrumento matemático (Chichilnisky, G., 1977). En el primer sentido, se proponía como meta una sociedad con base en la igualdad de las personas, donde: (I) se reconozca a cada una, por el solo hecho de existir, el derecho inalienable a la satisfacción de las necesidades básicas (NB) – alimentación, vivienda, salud, educación – que son esenciales para participar en la cultura y en las decisiones sociales; y, (II) el sistema productivo, determinado y gestionado socialmente, tenga como objetivo prioritario la satisfacción de las NB y el consumo no sea un valor per se, es decir, donde se produzcan los bienes básicos y culturales que realmente se necesitan, en compatibilidad con el ambiente y sin malgastar recursos. En el segundo sentido, el

MML era un instrumento matemático para investigar la factibilidad material de la sociedad propuesta. Era esencialmente un modelo económico (Chichilnisky, G., 1977) que: (a) distinguía 5 sectores: alimentación; educación; vivienda; bienes de capital; y, otros servicios y bienes de consumo; (b) adoptaba una función de producción del tipo Cobb-Douglas que permitía la sustitución de capital por trabajo, lo cual era esencial para los países subdesarrollados; (c) tenía en cuenta el efecto del adelanto tecnológico sobre la productividad; (d) optimizaba la asignación de recursos a cada sector maximizando en cada etapa la esperanza de vida al nacer (EVN), una variable más sensible a las condiciones de vida de la población que el PBI por habitante, como hacían otros modelos globales (Hughes, B.B., 1985); y, (e) trataba la evolución demográfica en cada etapa temporal no como dato exógeno invariable sino como el resultado de la situación socioeconómica, la EVN y la mortalidad infantil, entre otras variables (Chichilnisky, G., 1977), (Scolnik, H.D., 2018).

Resultados, difusión internacional y enseñanzas

Entre 1972 y 1973 la FB informó sobre el proyecto en diversas reuniones internacionales (Grondona, A., 2020). Además, el MML se presentó: (i) en octubre de 1974 en la Second IIASA Symposium on Global Modelling en Viena (Bruckman, G., 1976); (ii) en la VIII Reunión del CLACSO realizada en Quito del 24 al 26 de noviembre de 1975 (FB, 1976); y, (iii) en un simposio internacional sobre desarrollo organizado por la UNESCO en Enschede (Holanda) en 1976 (Ramos, V., 2016). La difusión internacional de los resultados continuó en los años siguientes (Grondona, A., 2020).

Un libro sobre el proyecto, titulado "¿Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo mundial latinoamericano" se publicó en Canadá (1976), Francia (1977), Alemania (1977), Japón (1976) y Holanda (1978). Posteriormente se publicaron trabajos sobre el MML (Chichilnisky, G., 1977) y comparaciones del MML con otros modelos globales (Hecox, W.E., 1976), (Meadows et al, 1982), (OTA, 1982), (Hughes, B.B., 1985). La primera versión en castellano del libro sobre el MML se editó en 1977 y se reeditó en 2004 (Herrera, et al, 2004). En esta obra se plantea, entre otros resultados, que si se aplican las medidas planteadas por el MML: (a) AL podría alcanzar niveles adecuados de bienestar en un plazo algo mayor que una generación; (b) el crecimiento de la población alcanzaría un estado de equilibrio sin imponer controles de la natalidad; (c) el equilibrio podría alcanzarse mucho antes de que pudiere saturarse la capacidad de producir alimentos; y, (d) las tasas de crecimiento de la economía requeridas para conseguir los objetivos serían menores que las necesarias para alcanzarlas, en el mismo tiempo, manteniendo la organización socioeconómica y los valores vigentes.

A modo de cierre de esta sección cabe decir que el MML es un destacado producto del trabajo interdisciplinario que, con base en una cosmovisión humanista y crítica situada en la realidad de los países subdesarrollados de esos años, cuestionó activa y responsablemente las conclusiones y recomendaciones por el World3 (Meadows et al, 1982). Concretamente, mediante detalladas simulaciones computacionales acordes con el "estado del arte" de la época, el MML prestó apoyo a varias concepciones clave para pensar los futuros posibles: (I) el destino humano no depende de barreras físicas insuperables, sino de factores sociales y políticos, que compete a los humanos modificar; (II) existe un camino materialmente viable hacia un futuro sustentable, cuya concreción depende de la voluntad y las acciones humanas, a saber, construir una sociedad igualitaria, participativa, no consumista, con base en el trabajo, la creatividad y

la satisfacción de las necesidades humanas; y, (III) para que dicho futuro sea realmente posible, los diversos factores que sostienen el sistema de relaciones intra- e internacionales deben ser cuestionados y modificados. Como destacó (Oteiza, E., 1995), a pesar de la modestia de los recursos de los que dispuso la FB, este modelo "de factibilidad" estuvo tan bien concebido y realizado que quedó consagrado entre los trabajos de similar importancia a nivel mundial (Hughes, B.B., 1985).

Otras enseñanzas que dejó elaboración del MML son las siguientes (Díaz, L., 2016): (A) los países subdesarrollados no pueden recibir de manera acrítica las conclusiones con pretensiones de objetividad generadas en los centros "más importantes" de pensamiento, porque las mismas implican supuestos implícitos, que obedecen a una cosmovisión que no es necesariamente compartida por los primeros; en realidad, explorar y discutir esos supuestos puede conducir a la construcción de conceptos más adecuados a las necesidades y proyectos del Tercer Mundo; y, (B) es posible concebir un estilo de investigación que parta de la identificación de los problemas a resolver, para decidir sobre esta base qué especialistas y qué instituciones deberían ser convocadas a cooperar en la construcción de las soluciones a los mismos. Sobre este último aspecto había insistido ya (Herrera, A.O., 1968b) y (Herrera, A.O., 1973b).

POLÍTICA CIENTÍFICA Y GEOCIENCIAS: AÑOS EN SUSSEX Y CAMPINAS

En 1973 Amílcar Herrera recuperó su cargo universitario, pero no llegó a ejercer porque la UBA se hallaba intervenida (Ramos, V., 2016). En 1974 publicó su segundo libro sobre recursos minerales de AL (Herrera, A.O., 1974). A raíz del golpe que instauró en Argentina una cruenta dictadura cívico-militar, Herrera se trasladó en noviembre de 1976 a Inglaterra, donde se incorporó a la Science Policy Research Unit de la Universidad de Sussex. En este prestigioso centro de investigación en ciencia y tecnología participó en la vida académica, profundizó su reflexión y publicó trabajos de investigación (Dagnino, R., 1995).

En 1977 Herrera participó en Brasil en un seminario sobre ciencia, tecnología e dependencia organizado por la Universidad de Campinas (UNICAMP). Invitado entonces por el coordinador general de las facultades de la UNICAMP, dejó Sussex en 1979 y se instaló en Campinas (Dagnino, R., 1995), donde fundó el 21/9/1979, el Instituto de Geociencias (IG). El IG fue concebido como una unidad académica multidisciplinaria dedicada a explorar líneas de trabajo relevantes para el país y la región que fuesen insuficientemente cultivadas. Concretamente, Herrera dividió el IG en tres áreas básicas: (i) Administración y Política de Recursos Minerales; (ii) Metalogénesis; y, (iii) Política Científica y Tecnológica. La actividad de investigación en el área de Administración y Política de Recursos Minerales se inició con la búsqueda de un modelo de demanda de recursos minerales que reunió a investigadores de los institutos de Ciencias Humanas y de Matemática (Dagnino, R., 1995). El programa de investigación en Política Científica y Tecnológica, inédito en la universidad brasileña, se inició en 1980 con un reducido grupo de profesores y alumnos de diversas unidades de la UNICAMP. Coordinado por Herrera, el grupo se consolidó hasta transformarse en un departamento de investigación y docencia que es considerado como uno de los principales en su área (Dagnino, R., 1995).

En la década de 1980 Herrera llevó adelante en el IG el proyecto "Prospectiva tecnológica para América Latina", apoyado por la Universidad de las Naciones Unidas, el cual fue concebido como un aporte de AL a la generación y difusión de la microelectrónica y a su inserción internacional (Martins, C.E., 2017).

EPÍLOGO: EL COMPROMISO DE UN INTELECTUAL HUMANISTA

En paralelo con su trabajo científico y universitario, Herrera dedicó sus años en Campinas a lo que humorísticamente denominaba la "cultura de las catacumbas": el convencimiento de que el mundo enfrentaba una profunda crisis multidimensional lo condujo a un amplio recorrido histórico-conceptual que incluye la evolución biológica y la caracterización de la dimensión sociocultural de los humanos (Dagnino, R., 1995). También publicó artículos como columnista en el diario Folha de São Paulo, cuya diversidad temática da cuenta de la amplitud de sus inquietudes intelectuales (Herrera, A., 2015). Como expresa (Nudler, O., 1995), su inmenso bagaje de información y su continua reflexión sobre temas que iban desde la evolución biológica hasta el desarrollo de las civilizaciones, le habían hecho concluir que la humanidad se hallaba, por primera vez en su historia, en una encrucijada decisiva, y que, si no resolvía los problemas materiales y vitales del conjunto de la población mundial, corría el riesgo de autodestruirse.

Motivado por la necesidad de comprender el carácter de esta crisis que se reflejaba en la creciente desigualdad social e internacional, el desempleo y otras urgencias, publicó en 1981 "La larga jornada" (Herrera, A.O., 1981). En esta obra sostenía que el mundo debía iniciar una nueva etapa evolutiva, orientada por perspectivas no reduccionistas, ni limitadas al crecimiento material, sino por una síntesis del conocimiento científico, artístico y humanista, incorporando también aquellos atributos de la personalidad humana que hicieron posible la civilización: la búsqueda del conocimiento por sí mismo y los sentimientos de amor y solidaridad.

Se jubiló en 1990, pero siguió activo en la UNICAMP como Profesor Emérito, participando en innumerables eventos, como invitado de universidades y organismos de todo el mundo. Así difundió los resultados de los trabajos en el IG y su pensamiento acerca de la realidad y del futuro de la región.

Amílcar Herrera falleció en Campinas el 23/09/1995. Como sugiere la presente sinopsis histórico-conceptual, fue un académico descollante, intelectual y éticamente comprometido con la ciencia, la tecnología, el pensamiento, la democracia y la justicia social. En una era de especialistas, este singular intelectual multifacético puso su conocimiento, dedicación, seriedad y creatividad al servicio de Argentina, Chile, Brasil, América Latina y el Tercer Mundo.

REFERENCIAS

Aceituno, P., Profesores argentinos en la FCFM: Una historia de colaboración universitaria que terminó mal. *Noticias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile*. Disponible en http://ingenieria.uchile.cl/noticias/149218/patricio-aceituno-una-historia-de-colaboracion-que-termino-mal. Publicado el 18/11/2018.

Arellano Hernández, A., Arvanitis, R. y Vinck, D., Circulación y vinculación mundial de conocimientos. Elementos de la antropología de los conocimientos en y sobre América Latina. *Revue d´anthropologie des connaissances*, Vol.6, nº 2, 1-28 (2012).

Barbieri Masini, E., *The Legacy of Aurelio Peccei*. European Support Centre of the Club of Rome and Fondazione Aurelio Peccei, Vienna, 2006.

Bloomfield, B.P., *Modelling the World: The Social Construction of Systems Analysis*. PhD Thesis. The Open University, 1984.

Borches, C., ¿Científicos y espías? La historia de los renunciantes de 1966 expulsados de Chile por espionaje. *Jornadas 50 años de la Noche de los Bastones Largos*. Universidad de Buenos Aires, 2016. Disponible en http://www.uba.ar/50nbl/archivos/jornadas.pdf

Bruckman, G., (editor) *Latin American World Model. Proceedings of the Second IIASA Symposium on Global Modelling*. October 7-10 1974. Austria, November 1976.

Charrier, R., Aguirre, L., Hervé, F., Klohn, E., Thiele, R., La carrera de Geología en la Universidad de Chile. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (UNC), Vol.5, Suplemento 1, 49-62 (2018).

Chichilnisky, G., Development Patterns and the International Order. *Journal of International Affairs*, Vol.31, Nº 2, 275-304 (1977).

Dagnino, R., Herrera: un intelectual latinoamericano. *REDES*, Nº 5, Vol.2, 141-146 (1995).

Díaz, L., El Modelo Mundial Latinoamericano. *La Ménsula*, Nº 22, 10-12 (2016).

Feld, A., Las primeras reflexiones sobre la ciencia y la tecnología en la Argentina: 1968-1973. *REDES*, Nº 32, Vol. 17, 185-221 (2011).

Forrester, J.W., *World Dynamics*. Wright-Allen Press Inc. Cambridge, Massachusetts, 1971.

Fundación Bariloche (FB), Modelo mundial latinoamericano. *Nueva Sociedad*, Nº 22, 16-29 (1976).

Fundación Bariloche (FB), *Modelo Mundial Latinoamericano. Síntesis Informativa*. ILPES-CEPAL, Programa de Capacitación, CDA-9, 1978.

Furtado, C., El mito del desarrollo y el future del Tercer Mundo. *El Trimestre Económico*, 41(162) 407-416 (1974).

Gallopín, G.C., The Latin American World Model: three decades ago. *Futures* 33, 77-88 (2001).

Grondona, A., Los límites del desarrollo rebatidos desde el Sur. *Pasado Abierto* (en línea), Nº 11 (2020). Disponible en https://fh.mdp.edu.ar/revistas/index.php/pasadoabierto

Hecox, W.E., Limits to Growth Revisted: Has the World Modeling Debate made any Progress? *Boston College Environmental Affairs Law Review*, Vol.5, 65-96 (1976).

Herrera, A., *Ciencia y política en América Latina* (Prefacio). Biblioteca Nacional, Buenos Aires, 2015.

Herrera, A.O., *Geology of the Area Southest of Florence, Fremont County, Colorado*. Master of Science Thesis. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, May 1951.

Herrera, A.O., Geochemical Evolution of Zoned Pegmatites of Argentina. *Economic Geology*, Vol.63, 13-29 (1968a).

Herrera, A.O., La ciencia en el desarrollo de América Latina. *Revista Estudios Internacionales*, 2 (1), 38-63 (1968b).

Herrera, A.O., Notas sobre la ciencia y la tecnología en el desarrollo de la sociedad latinoamericana. Introducción a la obra *América Latina: Ciencia y tecnología en el desarrollo de la sociedad*. Editorial Universitaria S.A., Santiago de Chile, 1970.

Herrera, A.O., *Ciencia y política en América Latina*, Siglo XXI Editores, México, 1971.

Herrera, A.O., Un proyecto latinoamericano de modelo mundial. *Ciencia Nueva*, Nº 18, 11-15 (1972).

Herrera, A.O., Club de Roma. *Ciencia Nueva*, Nº 19, 71-72 (1972).

Herrera, A.O., Los determinantes sociales de la política científica y tecnológica, *Desarrollo Económico* 13 (49), 113-134 (1973).

Herrera, A.O., La creación de tecnología como expresión cultural. *Revista de Comercio Exterior*, Octubre-diciembre, 991-998 (1973b).

Herrera, A.O., *Los recursos minerales y los límites del crecimiento económico*. Siglo XXI Editores S.A., México, 1974.

Herrera, A.O., Scolnik, H.D., Chichilnisky, G., Gallopín, G.C., Hardoy, J.H., Mosovich, D., Oteiza, E., Romero Brest, G.L., Suárez, C.E. y Talavera, L., *¿Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial Latinoamericano 30 años después*. IDRC e Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo IIED-América Latina, Buenos Aires, 2004.

Herrera, A.O., *La larga jornada. La crisis nuclear y el destino biológico del hombre*. Siglo XXI Editores S.A., México, 1981.

Hughes, B.B., World Models: The Bases of Difference. *International Studies Quarterly*, Vol.29, Nº 1, 77-101 (1985).

Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN), *Amílcar Herrera en el departamento de Ciencias Geológicas: Homenaje al geólogo y pensador latinoamericano*. http://www.idean.gl.fcen.uba.ar/2016/05/13/amilcar-herrera-en-el-departamento-de-ciencias-geologicas-homenaje-al-geologo-y-pensador-latinoamericano/.

Lavandaio, E. y Catalano, E., (editores), *Historia de la Minería Argentina*, *Tomo 1*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires, 2004.

Mallmann, C., Amílcar Herrera: uno de nuestros grandes, *REDES*, Nº 5, Vol. 2, 135-136 (1995).

Martins, C.E., Herrera, Amílcar. *Enciclopedia Latinoamericana* (on line), Boitempo, Sao Paulo, Brasil. Contenido disponible en http://latinoamericana.wiki.br/es/entradas/h/herrera-amilcar.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens III, W.W., *The Limits to Growth*. Universe Books, New York, 1972.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens III, W.W., A response to Sussex, *Futures*, 5(1), 135-152 (1973).

Meadows, D., Richardson, J. and Bruckmann, G., *Groping in the Dark*. John Wiley, 1982.

Nudler, O., Amílcar Herrera: una evocación personal. *REDES*, Nº 5, Vol. 2, 132-134 (1995).

Office of Technological Assessment (OTA*), Global Models, World Futures and Public Policy: A Critique*. Washington, 1982.

Oteiza, E., In memoriam-Amílcar Herrera. *REDES*, Nº 5, Vol. 2, 137-140 (1995).

Peccei, A., Global Modelling for Humanity. *Futures*, 14(2), 91-94 (1982).

Penchaszadeh, P.E. (compilador), *Exactas exiliada*. EUDEBA, Buenos Aires, 2016.

Ramos, V., Amílcar Herrera. La larga jornada. *La Ménsula*, Nº 22, 1-5 (2016).

Ramos, V.A., El inicio y desarrollo de la geología en la Universidad de Buenos Aires. *Revista del Museo de La Plata*, Vol.1, Número Especial: "La Historia de la Geología en el Bicentenario de la Argentina", 217-227 (2016).

Ramos, V.A., El desarrollo de la Geología en la Universidad de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (UNC), Vol.5, Suplemento 1, 23-32 (2018).

Rougier, M.N, *El Banco de Crédito Industrial Argentino y la política económica del peronismo, 1944 a 1949*. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias Económicas, UBA. Buenos Aires, 1999.

Sabato, J.A., Más sobre el Club de Roma. *Ciencia Nueva*, Número 20, 61 (1972).

Sabato, J.A., (compilador) *El pensamiento latinoamericano en la problemática ciencia-tecnología-desarrollo-dependencia*. Editorial Paidós, Buenos Aires, 1975.

Sauro, S., Cosmovisiones, utopías y polémicas a propósito del Club de Roma y del modelo mundial latinoamericano. *Revista de la Red de Intercátedras de Historia de América Latina Contemporánea* (Córdoba), Nº 2, 28-45 (2015).

Scolnik, H.D., Crítica Metodológica al modelo WORLD 3. *Ciencia Nueva*, Nº 25, 43-47 (1973).

Scolnik, H.D., Medio Siglo de Matemática Aplicada (Optimización, Modelos, Criptografía). *Ciencia e Investigación, Reseñas*, Tomo 6, Nº 2, 64-72 (2018).

Scolnik, H., *Ciencia y política en América Latina* (Estudio introductorio). Biblioteca Nacional, Buenos Aires, 2015.

Sito, N., Ciencia y Política en América Latina. *Desarrollo Económico*, Nº 42/44, Vol.11, 327-330 (1971/1972).

Sunkel, O., El marco histórico del proceso de desarrollo y de subdesarrollo. *Cuadernos del Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social*, Santiago de Chile, 1967.

Tamames, R., *La polémica sobre los límites al crecimiento*. Alianza Editorial, Madrid, 1974.

Tobal, J., El compromiso social de Amílcar Herrera. *La Ménsula*, Nº 22, 6-9 (2016).

Unzué, M., *Profesores, científicos e intelectuales. La Universidad de Buenos Aires de 1955 a su Bicentenario*. CLACSO, Buenos Aires, 2020.

Urquidi, V., *Allende el año 2000*. Prólogo a la edición en español del libro The Limits to Growth (Meadows et al, 1972). FCE, México, 1972.

Varsavsky, O., El Club de Roma. *Ciencia Nueva*, Nº 18, 16 (1972).

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURA EN HORMIGÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA Y DESCOMPOSICIÓN EMPÍRICA EN MODOS

Flores Rodríguez J.J.[a,b], Zitto M.E. [a], Muszkats J.P. [a,c], Sassano M. [a,d] y Piotrkowski R.[a,e]

[a] Departamento de Matemática, FIUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA
[b] Facultad de Ciencia y Tecnología, UDABOL, Universidad de Aquino Bolivia, BOLIVIA
[c] Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA
[d] Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA
[e] ITECA UNSAM-CONICET, Escuela de Ciencia y Tecnología, Centro de Matemática Aplicada, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

e-mail: series.nsnl@fi.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se analizan señales de Emisión Acústica (AE) provenientes de un ensayo dinámico que simula un terremoto sobre una losa de hormigón (ver Zitto et al, 2015). Cuando la energía acumulada en una pequeña zona del material supera cierto umbral, el material se fractura. La energía mecánica es liberada en la forma de ondas elásticas que son detectadas por sensores piezoeléctricos en la superficie del material, que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Estas señales eléctricas son de tipo ráfaga o hits. Como los procesos involucrados son estocásticos no estacionarios y no lineales, las señales de AE o sea los hits, se analizan con métodos adecuados tales como la Descomposición Empírica en Modos (EMD) y la transformada de Hilbert, que en conjunto constituyen la Transformada Hilbert-Huang. En la EMD cada hit de AE se expresa como la suma de una cantidad pequeña de modos, que pueden considerarse como funciones AM-FM. Para el cálculo de índices descriptores de daño y la evolución de las frecuencias características se evalúa la entropía espectral, basada en la entropía de Shannon, para cada hit y sus modos. De esta manera se logra determinar el modo que caracteriza a los hits que provienen de macrofracturas y por lo tanto los responsables de niveles críticos de daño. Además los mínimos relativos de entropía preceden a los saltos bruscos de energía de AE acumulada, actuando como precursores de dichos niveles críticos.

Palabras Clave: Hormigón Armado, Emisión Acústica, Transformada Hilbert-Huang, Entropía Espectral.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se utilizan marcos de hormigón armado (HA) para construir estructuras en regiones de sismicidad moderada o alta. Estas estructuras pueden estar sujetas durante su tiempo de vida a terremotos de diferente gravedad. Los terremotos moderados (dependiendo de la zona) pueden ocurrir varias veces durante la vida útil de un edificio, generalmente causan grietas en el concreto y deformaciones plásticas limitadas en el acero de refuerzo y eso da como resultado daños por fatiga de bajo ciclo a los componentes estructurales (vigas, columnas, juntas, etc.) lo que representa un fenómeno acumulativo que puede conducir a la necesidad de una reparación por razones de durabilidad o seguridad (Ohtsu 2001, Ohtsu 2006). Sin embargo, debido a que las estructuras generalmente están cubiertas por tabiques, techos, revestimientos y demás, evaluar el daño mediante una simple inspección visual es complicado y poco confiable. Además, es insuficiente para evaluar las consecuencias de la deformación plástica del acero de refuerzo principal, es decir, un crecimiento significativo de las grietas macroscópicas y del daño

acumulado en el concreto, para determinar el nivel de daño a la estructura. Es por este motivo que un análisis a través de señales o series temporales de emisión acústica para el evaluar el daño se torna más que interesante.

EMISIÓN ACÚSTICA (EA)

Se entiende por Emisión Acústica (EA) a las ondas elásticas que se generan en un material cuando se ejercen ciertas acciones sobre él, podría pensarse a la EA como un ultrasonido generado naturalmente al producir inestabilidades en el material. Como ejemplo podría mencionarse el crecimiento de una fisura interna como consecuencia de una tensión aplicada al material, produciéndose ondas elásticas, que se propagan por el medio y pueden ser detectadas en su superficie, indicando la existencia de fisuras. Las señales de EA se clasifican en dos tipos: tipo explosión o burst (ver Fig. 1). Las primeras son pulsos transitorios tipo paquete de duración acotada. Las otras no tienen comienzo ni final y en los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales.

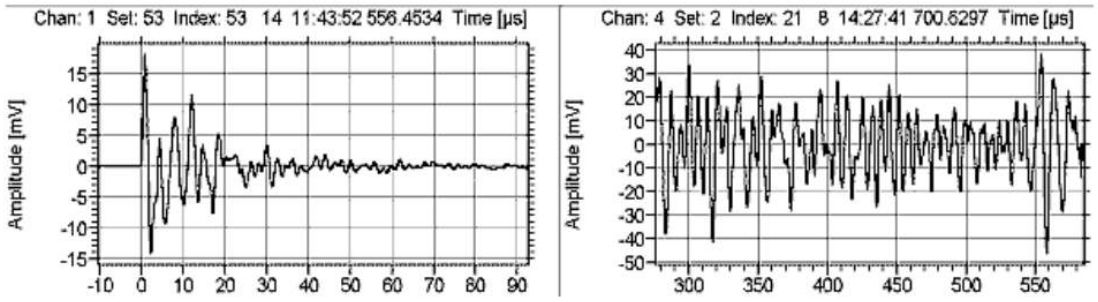


Figura 1. Señales de EA amplitud vs tiempo. Izquierda: Tipo explosión (burst). Derecha: Tipo continúo.

SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es un registro de una magnitud en diferentes instantes de tiempo. Puede ser registrada en un conjunto discreto de valores temporales (serie discreta) o continuamente en un intervalo de tiempo (serie continua). Los valores registrados en diferentes instantes están influidos al menos en parte por un mecanismo aleatorio y en mayor o menor medida correlacionados. En general no puede ser descrita por una fórmula matemática simple. Aunque supongamos que la serie emerge como solución de ecuaciones diferenciales (ejemplo, las ecuaciones de Maxwell) los valores están contaminados por errores aleatorios de medición.

MÉTODOS TRADICIONALES DE ANÁLISIS DE SEÑALES

Existen técnicas de análisis de señales y series temporales muy conocidas donde los principales elementos para caracterizar un evento de una señal o serie temporal son tres:

- La magnitud del mismo, valor asociado al evento respecto al valor fundamental.
- Contenido en frecuencia.
- Duración en tiempo.

No todas las técnicas tradicionales tienen la posibilidad de caracterizar estas tres variables, lo que limita su aplicación a tan solo una parte de los posibles eventos. En un enfoque tradicional, siguiendo a Fourier, el mismo consiste en dejar el espacio de observación, o sea el dominio temporal, en donde los datos se presentan crudos y pasar a otro espacio, por ejemplo el frecuencial, para "ver" a la señal desde otra perspectiva. De esta forma, la representación frecuencial resume el contenido global de frecuencias presentes en la señal. Este modo de trabajo presenta rápidamente algunas limitaciones, especialmente importantes en presencia de no estacionariedades. Se hace necesaria entonces una representación conjunta en tiempo y en frecuencia, que pueda reflejar las variaciones temporales de las frecuencias que nuestros sentidos estén tan acostumbrados a percibir. La transformada de Fourier de tiempo corto es una representación tiempo - frecuencia. En ella, se limita el período de observación de la señal mediante una ventana (he allí el tiempo corto) deslizante, logrando cuantificar un contenido frecuencial local capaz de reflejar los cambios frecuenciales mencionados. Por otro lado a menudo es conveniente ver a la señal en otro espacio: el de las escalas (relacionado con la inversa de la frecuencia). La transformada ondita, o wavelet en inglés, es la representación tiempo-escala más estudiada. En ella se compara a la señal de interés con una forma de onda particular (la wavelet madre) que en general posee soporte compacto (o decae suficientemente rápido). Trasladando y dilatando la ondita se logra una representación que permite apreciar las variaciones temporales de las escalas presentes. Sin embargo debido a la indeterminación de frecuencias que presenta la TWC otra técnica de análisis se hace más interesante, la descomposición empírica en modos (EMD).

DESCOMPOSICIÓN EMPÍRICA EN MODOS (EMD)

La Descomposición Empírica en Modos (EMD, del inglés Empirical Mode Decomposition), presentada por Huang et al 1998, es una técnica relativamente nueva con un enfoque por completo diferente. Esta técnica trabaja directamente en el espacio de observación, obteniendo los modos sin ninguna transformación de por medio. De manera completamente guiada por los datos, esta técnica separa una señal en oscilaciones localmente rápidas y lentas. Al final, la señal original se expresa como la suma de una cantidad pequeña de modos, que en ciertos casos pueden representarse como funciones AM-FM. Sin embargo, al no basarse la EMD en la idea de identificar un modo por cada cresta, sino que puede agrupar varias en un mismo componente, es capaz de representar modos más complejos que simples funciones circulares, y por lo tanto se constituye en un método más versátil. De manera general, a diferencia de las técnicas mencionadas anteriormente, la técnica de EMD obtiene los modos directamente de la serie analizada:

$$x(t) \xrightarrow{EMD} \{x_k(t)\} \tag{1}$$

La técnica de EMD descompone series oscilantes de una forma completamente local y guiada por los datos. EMD consiste en considerar oscilaciones en la serie a un nivel local. Si se observa la evolución de una serie oscilante $x(t)$ entre dos puntos extremos (por ejemplo entre dos mínimos consecutivos ubicados en $t = a$ y $t = b$) podemos definir heurísticamente una componente local de alta frecuencia que corresponde a la oscilación entre los dos mínimos y que debe pasar necesariamente por un máximo existente entre ellos. Si, de alguna forma, extendemos este análisis para todas las oscilaciones entre los extremos locales de la serie, podemos expresar para todo t:

$$x(t) = c_1(t) + r_1(t) \tag{2}$$

donde $c_1(t)$ será la componente que oscile localmente más rápido, mientras que $r_1(t)$ lo hará localmente más lento. En la Fig. 2 puede verse un ejemplo sencillo que ilustra este primer paso de la descomposición.

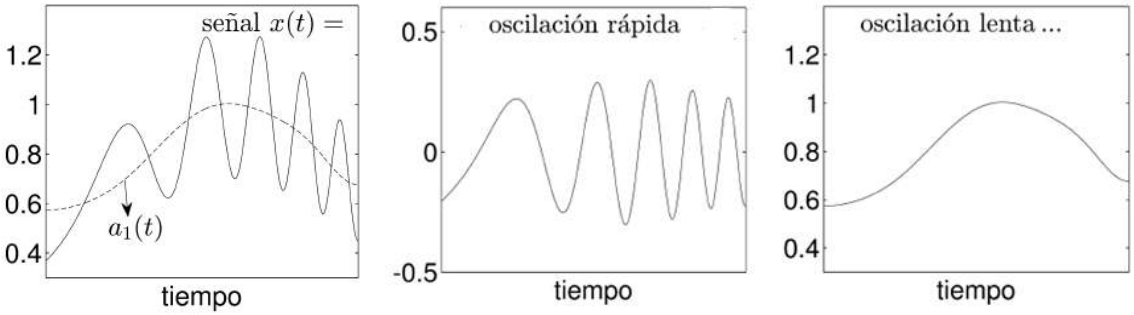


Figura 2. Descomposición de una señal en oscilaciones rápidas y lentas. La señal o serie oscilante $x(t)$ se descompone en la suma de su media local $c_1(t)$ más el modo $r_1(t)$.

Al analizar, el esquema descrito produce una descomposición de la forma:

$$\begin{aligned} x(t) &= c_1(t) + r_1(t) \\ &= c_1(t) + c_2(t) + r_2(t) \\ &\vdots \\ &= r_K(t) + \textstyle\sum_{k=1}^{K} c_k(t) \end{aligned} \tag{3}$$

TRANSFORMADA HILBERT - HUANG (HHT)

La HHT consiste en la combinación de un algoritmo denominado descomposición empírica en modos (EMD), con la HT tradicional (EMD+HT).

TRANSFORMADA DE HILBERT

Dada una señal real $x(t)$ que pertenece a $L^2(\mathbb{R})$, se define su transformada de Hilbert como

$$\mathcal{H}[x(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \tag{4}$$

Donde PV representa el valor principal de la integral. La transformada de Hilbert permite obtener la componente en cuadratura de una señal o serie unidimensional dada, es el caso de la función coseno $\mathcal{H}[\cos(\omega t)] = \sin(\omega t)$ diferencia de fase $\pi/2$.

En la formulación original de EMD sus autores perseguían la misma premisa con la que comenzamos este capítulo: dada una señal multicomponente, calcular y/o describir las propiedades de las frecuencias y amplitudes instantáneas de cada uno de sus componentes. En este contexto, la descomposición mediante EMD se considera como el primer paso de un análisis más extenso denominado transformada de Hilbert - Huang. Dicho análisis consiste en:

1. Dada la serie temporal $x(t)$, aplicar EMD: $x(t) \xrightarrow{EMD} \{c_k(t), k = 1,2, \dots, K\} \cup \{r_K(t)\}$

2. Para cada modo $c_k(t)$:
   a) Utilizar la HT para calcular la señal analítica $z_k(t) = c_k(t) + j\mathcal{H}[c_k(t)]$, donde $\mathcal{H}[c_k(t)]$ es la transformada de Hilbert de $c_k(t)$.
   b) Expresar z_k como $z_k(t) = A_k(t)e^{j\varphi(t)}$, donde $A_k(t)$ es la amplitud instantánea y $\varphi(\mathrm{t})$ es la fase instantánea.
   c) Calcular la energía $|A_k(t)|^2$, y la frecuencia instantánea $\omega_k(\mathrm{t}) = d\varphi(t)/dt$.

ENTROPÍA DE SEÑALES

En el contexto del análisis de señales o series temporales, la entropía es un parámetro que representa el grado de orden intrínseco o el grado de organización de la serie (ver por ejemplo Pan et al, 2009). Un valor de entropía relativamente bajo indica la existencia de una estructura reconocible en los patrones elementales. Por el contrario, un alto valor de entropía indica la falta de una estructura simple e identificable. Es importante mencionar que en análisis de señales o series temporales se utiliza con mucha frecuencia el modelo de entropía de información de Shannon, es así, que en el presente trabajo se analizarán las series temporales con dicha técnica. Dado que en este trabajo se trabaja con series temporales de EA, recurriremos a la definición de entropía de Shannon discretizada para hallar la entropía de la señal, a la cual denotaremos simplemente por la letra E.

$$E = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log p_i \tag{5}$$

Siendo $\sum_{i=1}^{N} p_i = 1$, N es la cantidad de valores posibles.

ENTROPÍA ESPECTRAL DE LA SEÑAL (SE)

La entropía espectral a la cual llamaremos SE no es muy complicada en su definición, se toma como función masa de probabilidad a la frecuencia. Es decir que nos informa sobre grado de desorden o incertidumbre de la serie temporal con respecto a la frecuencia y su distribución. Definimos a la entropía espectral para una serie o señal $x(t_i)$ como

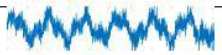
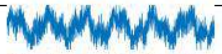
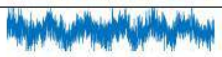
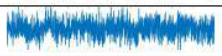
$$SE = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log p_i \tag{6}$$

$$p_i = \frac{\hat{S}(\omega_i)}{\sum_{k=1}^{N_\omega} \hat{S}(\omega_k)}$$

Donde $\sum_{i=1}^{N_\omega} p_i = 1$, $\hat{S}(\omega_i) = |\hat{x}(\omega_i)|^2$ y $\hat{x}(\omega_i)$ es la transformada discreta de Fourier de $x(t_i)$.

Para entender mejor como la entropía nos da cierta información acerca de una serie temporal, vamos a ejemplificar las definiciones anteriores mediante una señal de prueba $x(t) = 2\sin(2\pi 30t) + \sin(2\pi 80t)$ a la cual iremos añadiendo ruido blanco gaussiano con distintos valores de dispersión, de esta manera podremos ver cómo se comporta la entropía ante esta situación (ver tabla I).

Tabla I. Entropía espectral SE de una señal de prueba añadiendo varios niveles ruido.

Ruido (σ)	Señal	Espectro	SE
0			0.2552
0.1			0.6724
0.5			0.9048
1			0.9490
1.5			0.9605
3			0.9748
8			0.9914

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL EXPERIMENTO

Mencionaremos algunos detalles experimentales para mayor claridad, mientras que una descripción completa de las pruebas se pueden encontrar en (Benavent-Climent et al 2012, Zitto et al 2015). La estructura consiste en una losa de HA de 3 x 3 m de base y 125 mm de espesor, apoyada sobre cuatro columnas de acero de 2.8 m de alto. Fue diseñada de acuerdo con los códigos españoles y se preparó en el laboratorio de la Universidad de Granada (Fig. 3). La losa se refuerza con dos mallas de acero, uno en la parte superior hecho con barras de 6 mm de diámetro espaciados a 100 mm, y otra en la parte inferior que consta de barras de 10 mm de diámetro espaciados a 75 mm. La losa fue reforzada adecuadamente en las esquinas. Se añadieron bloques de acero en la losa para simular un piso superior. La estructura de la prueba se colocó en la mesa vibratoria uniaxial MTS 3x3 m2 de la Universidad de Granada y sometida a sucesivas simulaciones sísmicas con aumento del valor de la aceleración aplicadas a la mesa vibratoria. Cuando se aceleró la mesa vibratoria, la fuerza de inercia generada en la losa de HA y de los bloques de acero adicionales cargó dinámicamente el modelo de prueba. Los temblores fueron modelados de acuerdo al terremoto NS Calitri 1980. El control de la mesa vibradora se llevó a cabo con el controlador sísmico uniaxial 469 (469-USC) de MTS. El 469-USC es un controlador digital que ofrece un control de bucle de tres variables normalmente cerrado, además de control adaptativo. La arquitectura de hardware de control se basa en la tecnología de procesamiento de señal digital, que optimiza el rendimiento del sistema de control integrado y permite la implementación de control avanzado y operaciones de filtrado de datos. En Zitto et al, 2015 los autores encontraron que para las simulaciones de la primera etapa las columnas de acero mantuvieron su comportamiento elástico. Ya en la segunda etapa, las columnas de acero empezaron a registrar deformaciones más allá del límite de deformación elástica. Las deformaciones plásticas en las columnas de acero fueron extensas y graves en las simulaciones sísmicas finales. La pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y concreto circundante se debe al deterioro de la adherencia bajo cargas repetidas. Para las barras corrugadas, tales como los utilizados en la losa, el enclavamiento mecánico entre las costillas de acero de refuerzo y el hormigón se sabe que juega un papel importante. El hormigón entre las costillas se rompe fácilmente, y esto implica una rotura extensa y agrietamiento del hormigón que es una fuente de graves daños en elementos estructurales de HA sometidos a sismos. Por lo tanto, aunque el refuerzo de acero no cedió, se produjo agrietamiento del hormigón y de la evolución de la energía acústica acumulada (CAE) y la energía disipada acumulada (CDE) un indicador de daño comúnmente

aceptado. Durante las simulaciones sísmicas se puede inferir que la energía estaba siendo puesto en libertad.

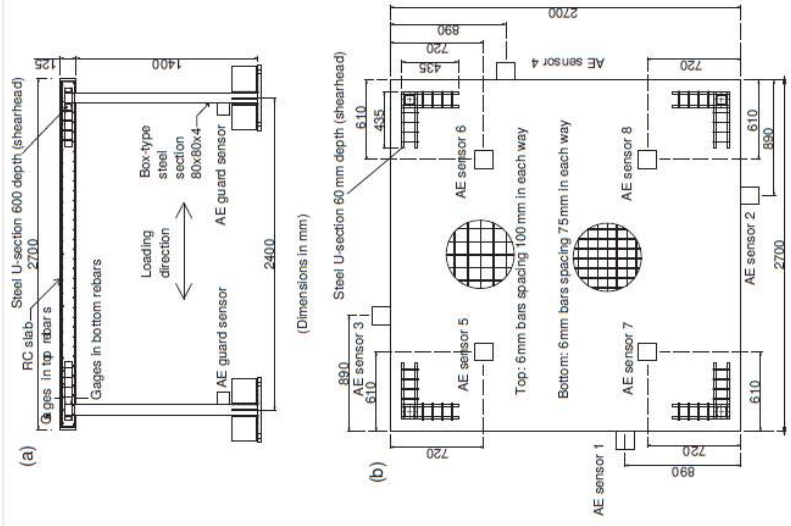


Figura 3. Modelo. a) elevación (vista lateral). b) planta (vista inferior).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DE LOS HITS MEDIANTE LA HHT

Si aplicamos la HHT a los hits de EA acústica (hits e IMFs) registrados a lo largo de todo el ensayo, podemos obtener el espectro de frecuencias de cada uno, los tiempos dónde ocurren las mismas y las energías correspondientes, es decir un análisis completo de las series. Sin embargo como se trata de 237 hits registrados durante el ensayo, vamos a clasificar los mismos en cuatro tipos de hits, según su espectro de Hilbert en: A, B, C y D. Estos cuatro tipos de hit representan a todos los hits registrados durante el experimento.

Hits tipo A. Comenzamos con los hits tipo A, mostrado en la Fig. 4, en la parte superior la señal original y en la parte inferior el espectro de Hilbert de todas sus IMFs. En la Fig. 4 se aprecia también el espectro de Hilbert en tres dimensiones. Este tipo de hit caracteriza en un 45% al total de los hits producidos durante el ensayo, se observa que posee frecuencias en el rango de 45 a 65 kHz (frecuencias altas) y 20 a 35 kHz (frecuencias bajas), es decir posee ambas bandas de frecuencias y la duración de cada una se muestra en a lo largo del tiempo *t*.

Hits tipo B. Los hits del tipo B (ver Fig. 5) son hits ubicados en una sola banda de frecuencias (frecuencias altas), poseen una frecuencia bastante definida alrededor de los 56 kHz y son de duración prolongada. Estos hits representan un 10% de la cantidad de hits totales, de igual manera que en la figura de tipo A, en la parte superior puede apreciarse la señal de EA original y en la parte inferior el espectro de Hilbert de la señal con todas sus IMFs.

Hits tipo C. El tipo C de hits constituyen un 30% de todos los hits, en la Fig. 6 se observa que tiene componentes distribuidos hacia las frecuencias bajas, a lo largo de casi toda la duración del hit, no tiene muy definida una frecuencia como en las del tipo B alrededor de un punto, sin embargo no presenta frecuencias altas.

Hits tipo D. Finalmente decimos que existe un cuarto tipo de hit el cual no habrá sido fácilmente distinguible de B, sino gracias a la HHT. Este tipo de hits comprenden un 15% de la cantidad total de hits registrados y son similares a B, están compuestos de una sola banda de frecuencias (frecuencias altas) pero como se muestra en la Fig. 7 son de corta duración.

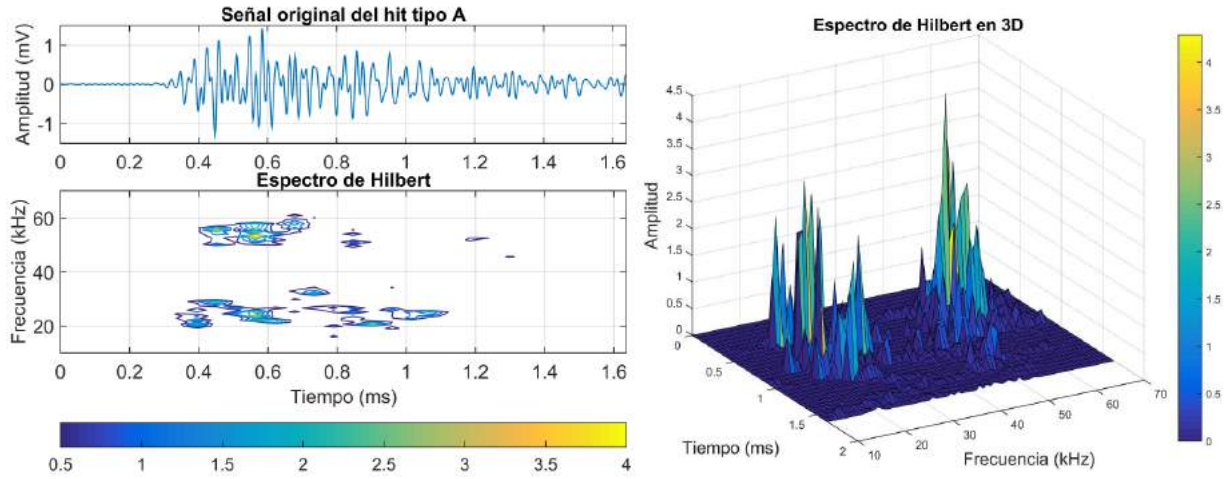


Figura 4. Hit tipo A (45% de los hits)

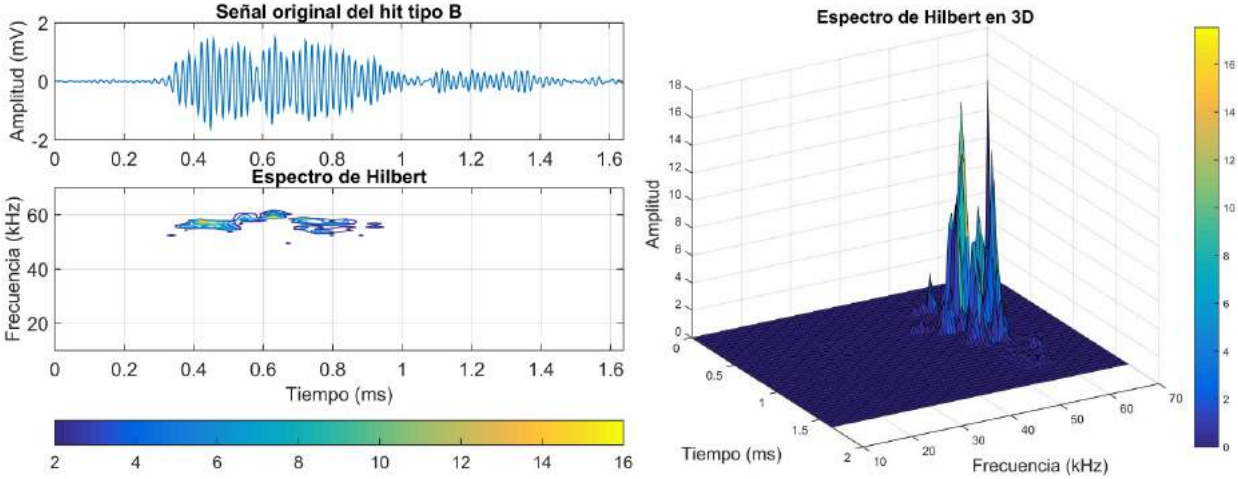


Figura 5. Hit tipo B (10% de los hits)

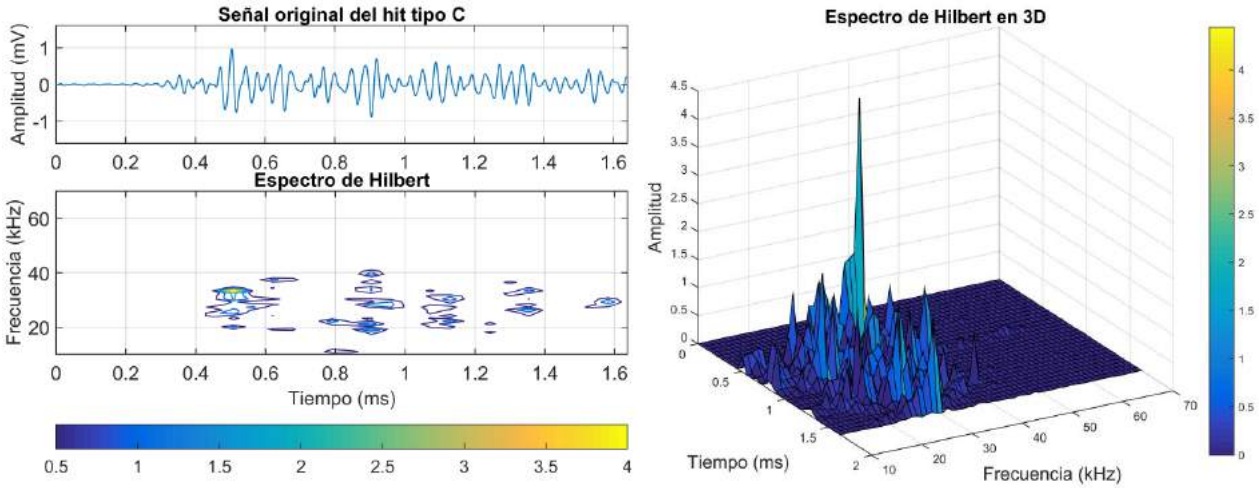


Figura 6. Hit tipo C (30% de los hits).

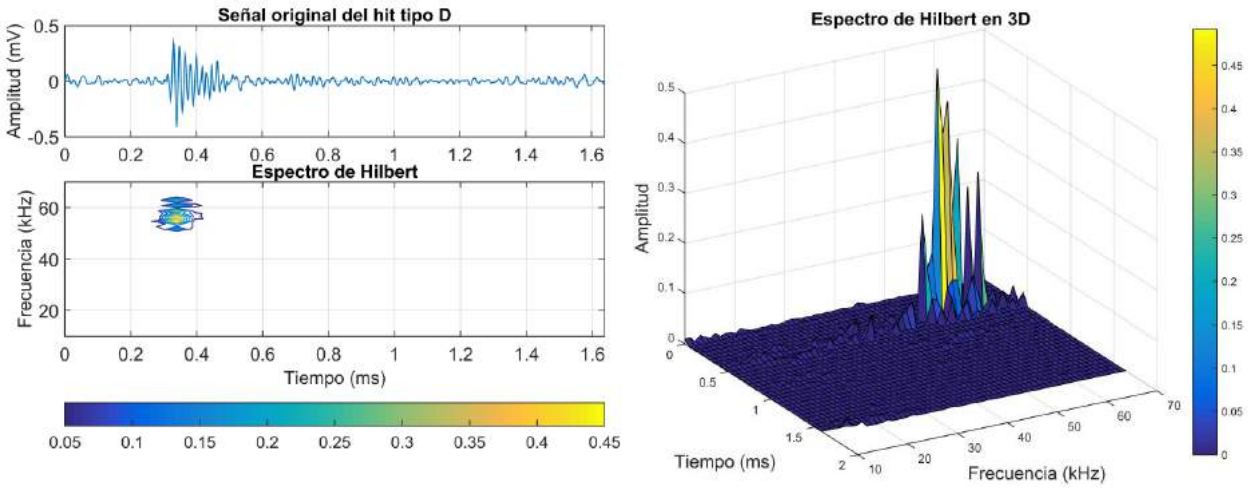


Figura 7. Hit tipo D (15% de los hits).

DETERMINACIÓN DE LAS IMFs QUE CARACTERIZAN A LA SEÑAL DE EA

Mediante una gráfica reflejamos el grado de similitud entre un hit y sus primeras 3 IMFs de una manera más cualitativa, pero para una interpretación más cuantitativa utilizaremos el Error cuadrático Medio (ECM). Tomamos como ejemplo el hit 49 ocurrido en t = 7,19 *seg*, en la figura 8 (izquierda) podemos ver los resultados de este análisis, en ella, se muestra el grado de reconstrucción de la serie a través de las IMFs comparado con la serie original y el valor del ECM obtenido en cada caso, es posible observar que las IMFs 1 y 2 son quienes sobresalen ante el resto, las demás IMFs (4, 5 y 6) solo son funciones de mínima amplitud y no son tomados en cuenta. La Fig. 8 (derecha) muestra en la parte superior la serie o señal original de EA (hit 49), comparado con la suma de solamente las IMFs 1 y 2 (las IMFs más sobresalientes).

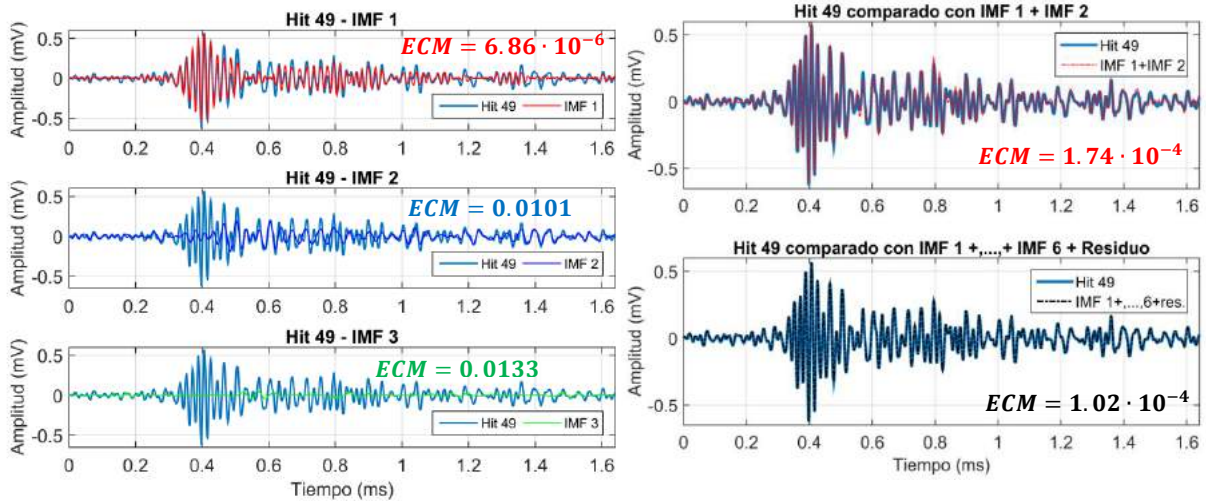


Figura 8. Izquierda: Hit-49 comparado con sus IMFs. Derecha: Reconstrucción del hit-49.

BANDAS DE FRECUENCIAS CON LA HHT

Ya en un análisis más exhaustivo hacemos uso de la HHT para afinar el análisis frecuencial como en Huang N. E. and S. S. Shen, para eso vamos a representar las IMFs 1, 2 y 3, incluimos la IMF 3 solo para fines comparativos, como se vio anteriormente esta IMF no es relevante para el hit. La figura 9 refleja un primer uso de la THH y su potente representación física que la hace muy fácil de interpretar. Tales figuras representan la ubicación de las frecuencias instantáneas para las IMFs antes mencionadas de los hits 9, 13, 50, 80, 151 y 237, ocurridos al principio, al medio y hacia el final del ensayo.

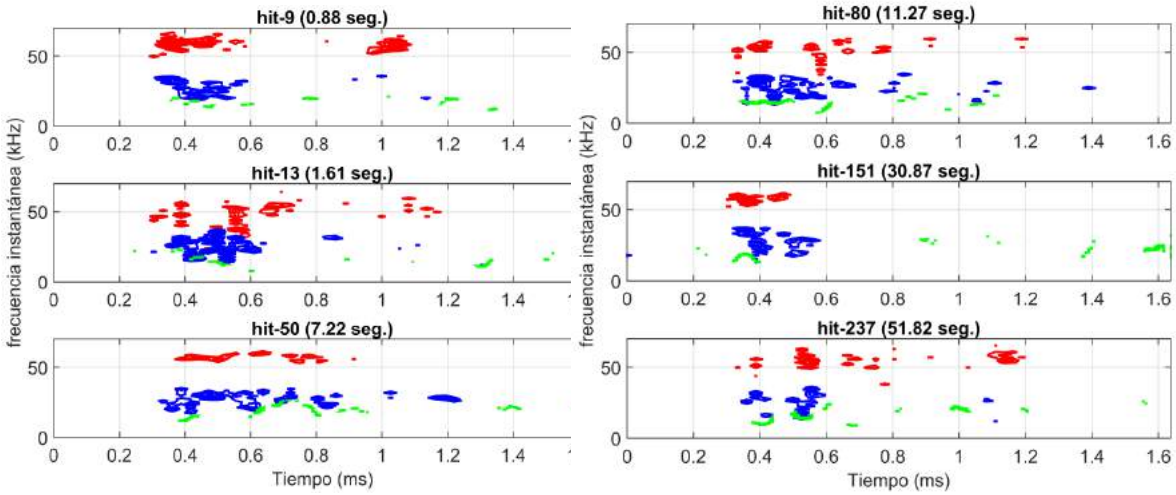


Figura 9. Frecuencia instantánea de las IMF 1 (color rojo), 2 (color azul) y 3 (color verde).

ANÁLISIS DE LAS IMFs CORRESPONDIENTES AL DAÑO DE LA LOSA

Una primera aproximación para determinar cuáles son los hits correspondientes al agrietamiento o fractura de la losa, es saber en qué intervalos de tiempo suceden. A estos intervalos de tiempo los vamos a denominar intervalos de mayor interés. Para determinar cuáles son los intervalos de tiempo de mayor interés a lo largo de todo el ensayo, observamos inicialmente como se comporta la serie registrada por el acelerómetro, utilizado para medir la aceleración de la mesa vibratoria. Si se observa detenidamente el acelerograma mostrado en la figura 10 (izquierda), vemos que los mayores picos de aceleración se registran en los intervalos de tiempo $t \in [4, 12]$ *seg* y $t \in [28, 37]$ *seg*, sin embargo esto es solo un indicio para empezar a identificar a esos intervalos como de interés. Por otro lado también contamos con la información de la energía disipada acumulada (CDE), el mismo fue calculado a lo largo del experimento. Si graficamos la CDE a lo largo del tiempo del ensayo, podremos distinguir si existen o no los intervalos de interés buscados. Generamos adicionalmente un histograma con intervalos de 1/2 *seg* que refleja los hits según su tiempo de ocurrencia, es decir, dicho histograma nos dirá en que intervalos de tiempo se manifestaron los hits mayormente. La Fig. 10 (izquierda) muestra las figuras correspondientes al acelerograma, CDE e histograma de hits según tiempo de ocurrencia. En Zitto et al, 2015 se concluye de forma general que la gran mayoría de los hits aparecen en los picos más altos de la aceleración. Las gráficas de la figura 10 (izquierda) de alguna manera muestran resultados propios del experimento. Añadiendo nuestro aporte a este análisis, lo que haremos será capturar la IMF 1 presente en cada hit (reconstruida a partir de EMD) y generar una distribución de energía del mismo al igual que su energía acumulada (CAE). La figura 10 (derecha) en su parte superior muestra la

distribución de energía de las IMF 1 a lo largo de todo el ensayo, es decir para los 237 hits, en la parte inferior se muestra la suma acumulada CAE de todas las energías presentes en dicha IMF.

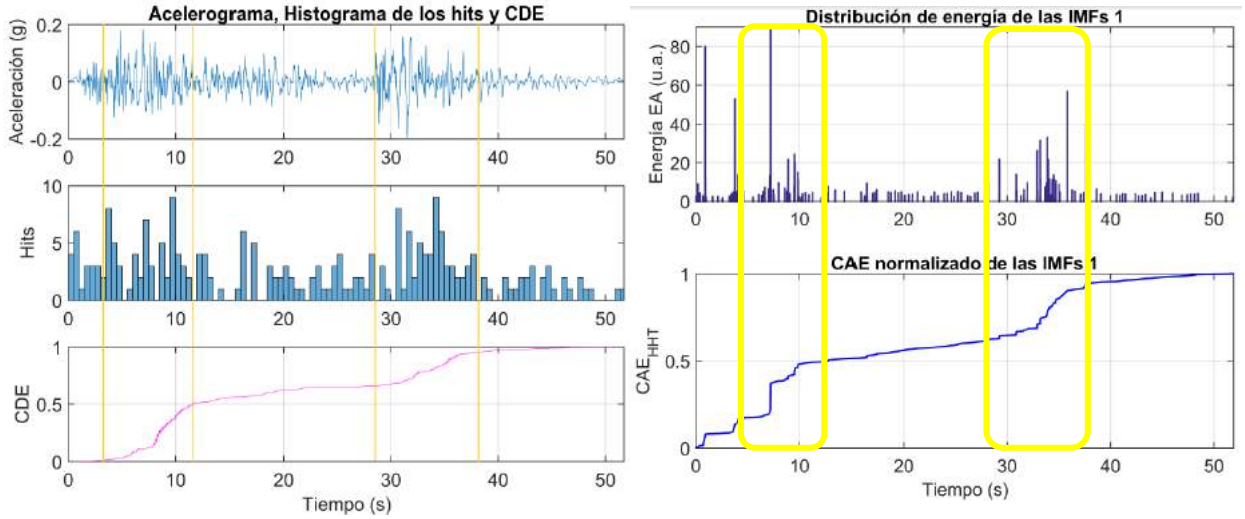


Figura 10. Izquierda: Intervalos de mayor interés. Derecha: Distribución de energía de las IMFs 1 de cada hit a lo largo de todo el ensayo y la CAE.

USO DE RESULTADOS PREVIOS Y TÉCNICAS PARA HALLAR LOS HITS RELACIONADOS CON LA FRACTURA

Muchos resultados importantes se han conseguido hasta el momento gracias a las herramientas matemáticas utilizadas a los largo del trabajo. Por todo lo que se ha venido obteniendo a través de las técnicas de análisis propuestas y también de trabajos previos, se sabe que las bandas de frecuencia presentes en la señales de EA son 45 a 65 kHz (relacionado con la fractura de la losa) y de 20 a 35 kHz (relacionado a otro tipo de eventos) (ver Zitto et al, 2015). Sería importante saber cuáles de los hits ocurridos en un determinado tiempo *t*, tienen frecuencias más puras en alguna determinada banda de frecuencia, es decir, aquellos hits que contengan en lo posible una banda de frecuencia mayormente concentrada en un punto a lo largo de su tiempo de duración, o el mayor tiempo posible. Una forma de determinarlo sería mediante el índice de ortogonalidad IO obtenido mediante EMD, el IO de una descomposición por EMD nos informa sobre la calidad en la descomposición de las IMFs, es decir si existe o no mezcla de modos, o si no fue posible descomponer la señal de la mejor manera. Si buscamos aquellos hits que menor IO presenten significaría que esos hits tienen una baja mezcla de modos y por lo tanto contienen frecuencias más puras Huang et al, 1998 (ver Fig. 11 izquierda). El umbral *U1* fue seleccionado en base a muchas pruebas, pero se encontró que un umbral *U1* = 0.0145 obtiene al rededor del 10% de la cantidad total de hits. Si aplicamos un procedimiento similar al del IO para la entropía espectral SE, podremos hallar los hits que poseen frecuencias más definidas. No aplicaremos la SE directamente a los hits, sino más bien a las IMFs 1 de cada hit que como vimos anteriormente, la IMF 1 es la IMF que mejor representa al señal y está relacionado con la fractura de la losa (ver Fig. 11 derecha). El umbral seleccionado *U2* = 0.7 permite nuevamente obtener alrededor de un 10% de la cantidad total de hits.

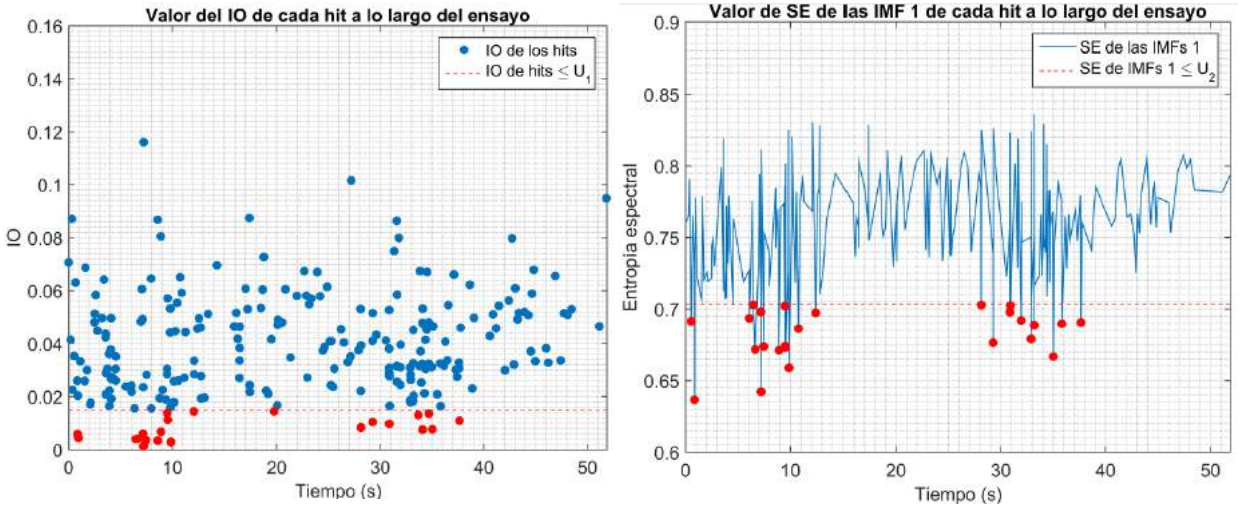


Figura 11. Izquierda: Índice de Ortogonalidad de cada hit. Derecha: Entropía espectral para IMFs 1

Se aprecia que la coincidencia de los hits que caen o quedan fuera de los umbrales respectivos de IO y SE es muy interesante, si hablamos de los 237 hits la coincidencia es de un 96% y si solo tomamos a los hits que cayeron dentro de los umbrales *U1* y *U2* la coincidencia es del 92 %, vale decir que casi son los mismos hits. Adicionalmente se analizaron los espectros de Hilbert de los hits hallados, encontrándose que los mismos pertenecen al tipo B. Si aún afinamos un poco más lo hecho en Benavent-Climent et al 2012, Zitto et al 2015, podemos decir que los hits correspondientes al agrietamiento se encuentran en la banda de 55 a 62 kHz y son de larga duración. Ahora bien, si distribuimos estos hits según su tiempo de ocurrencia *t* sobreponiéndose a la gráfica de la CDE (ver Fig. 12) se observa un resultado más que interesante y es que estos hits anteceden a una subida drástica de CDE.

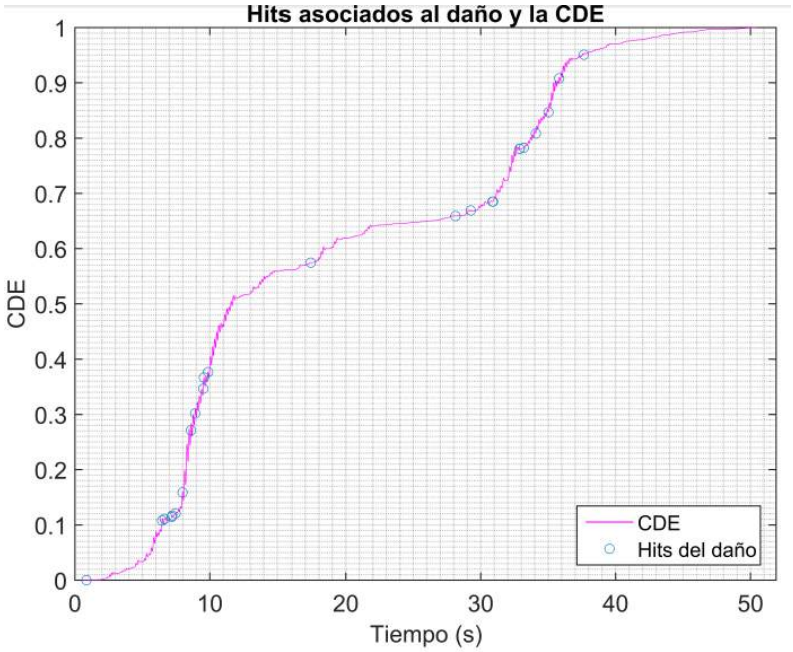


Figura 12. Hits asociados al daño sobre la gráfica de la *CDE*

CONCLUSIONES

- ✓ Se utilizó la técnica EMD, HT y la SE para caracterizar y clasificar los hits obtenidos durante el experimento de la losa, obteniendo así información útil en energía, tiempo y frecuencia.

- ✓ Se identificaron los hits del agrietamiento gracias al índice de ortogonalidad y la entropía espectral de los modos 1 de cada hit. Al ubicar esos hits sobre la gráfica de la CDE se pudo observar que se anticipaban a una subida brusca de energía, un resultado bastante interesante que sirve como un indicador de prevención.

REFERENCIAS

Benavent-Climent et al. An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads. *Structural Health Monitoring*. 11(1):69-81, 2012.

Huang N. E. and S. S. Shen. *Hilbert-Huang transform and its applications*, volume 5. World Scientific, 2005.

Huang et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 454, pages 903-995. The Royal Society, 1998.

Ohtsu M. The history and development of acoustic emission in concrete engineering. *Mag Concr Res* 2006;48(177):321-30.

Ohtsu M,Watanabe H. Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission. *Constr Build Mater* 2001;15:217-24.

Pan et al. "Spectral Entropy A Complementary Index for Rolling Element Bearing Performance Degradation Assessment." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. Vol. 223, Issue 5, 2009, pp. 1223-1231.

Piotrkowski et al: Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identifcation and evaluation of corroded galvanized steel. Mech. Syst. *Signal Process*. 23, 432-445 (2009).

Rilling G. and P. Flandrin. One or two frequencies? The Empirical Mode Decomposition answers. IEEE *Transactions on Signal Processing*, 56:85-95, 2008.

Sagasta F et al. Acoustic emission energy b-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 102 (2018) 262-277.

Zitto et al: Damage assessed by wavelet scale bands and b-value in dynamical tests of a reinforced concrete slab monitored with acoustic emission. Mechanical Systems and Signal Processing. 60-61(2015)75-89.

ALGAS MARINAS: DESAFÍOS DE UN BIOADSORBENTE

Foglino V. P.[a] y Salomone V. N.[a]

[a]*Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental -IIIA, UNSAM, CONICET, 3iA, ARGENTINA*

e-mail: vsalomone@unsam.edu.ar

RESUMEN

La adsorción es un proceso superficial donde una molécula o ión en solución es transferido a una superficie sólida. Se considera un método económico y apropiado para el tratamiento de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en aguas naturales y aguas de desecho, tales como efluentes domiciliarios o industriales. La eficiencia del proceso depende de las propiedades físicas y químicas de la sustancia en la solución y de la superficie del sólido. Además, se trata de un proceso reversible lo que permite la recuperación del contaminante y la reutilización del material. Existen numerosos materiales con gran capacidad de adsorción; entre ellos, carbón activado, zeolitas, y una gran variedad de materiales biológicos. En particular, resulta interesante el uso de biomateriales, ya que no requieren el uso de reactivos químicos para ser sintetizados, lo que los hace ambientalmente amigables y de bajo costo. Las algas marinas han sido evaluadas como material adsorbente en la remoción de metales tóxicos y compuestos orgánicos con resultados muy interesantes. La ventaja de las algas marinas es que se trata de un recurso muy abundante y accesible, con una gran capacidad de captar contaminantes, debido a la presencia de numerosos grupos funcionales en su pared celular, que actúan como sitios de unión para iones metálicos o compuestos cargados. El objetivo de este trabajo fue revisar los resultados más relevantes publicados sobre el uso de algas marinas como adsorbentes, así como también los distintos pretratamientos y el uso de tecnologías emergentes que aumentan la capacidad de adsorción y/o la selectividad.

Palabras Clave: Bioadsorción, Macroalgas, Remoción, Metales

INTRODUCCIÓN

La presencia de metales disueltos en agua es un problema ambiental serio, motivo por el cual se promueve el interés por el desarrollo de nuevos métodos de remoción, que sean más eficientes y económicos. La biosorción se postula como una alternativa de los tratamientos convencionales de soluciones contaminadas con iones metálicos. Particularmente, la utilización de macroalgas marinas muertas como biosorbentes ha mostrado resultados interesantes.

Las macroalgas son expulsadas por el mar en numerosas costas del mundo, convirtiéndose en residuos naturales que actúan como una amenaza para la industria turística. El uso de biomasa muerta presenta numerosas ventajas: entre ellas, el menor requerimiento de nutrientes en comparación con las algas vivas y la limitación de los efectos de toxicidad asociados a la adsorción de contaminantes (Areco et al, 2012; Plaza et al, 2011; Santos et al, 2018). Asimismo, el costo económico del material es bajo, ya que no necesita reactivos químicos para su síntesis. Por otra parte, la adsorción y desorción se alcanzan rápidamente (Michalak et al, 2013).

A pesar de las múltiples ventajas que presentan, aún persisten algunos desafíos en la implementación de las algas marinas como biosorbentes. Por ejemplo, debido a la liberación de sustancias orgánicas, como el alginato, que lixivia durante la biosorción, puede haber contaminación secundaria y, además, puede disminuir la capacidad de adsorción (Montazer-Rahmati et al, 2011). Por ende, aunque las publicaciones de la

biosorción han aumentado significativamente en las últimas décadas, existen aún limitaciones en cuanto a su aplicación industrial (Michalak et al, 2013).
El objetivo del presente trabajo fue hacer una revisión de los artículos científicos publicados en la última década, sobre el uso de macroalgas marinas muertas en la remoción de metales en solución acuosa, analizando el efecto de diferentes parámetros experimentales, tales como: pH, tiempo de contacto, temperatura, entre otros. El interés particular se colocó sobre los distintos pretratamientos químicos del biosorbente, para analizar sus efectos sobre las variables del proceso. Además, se incluyó en la búsqueda la recuperación del sorbato y reutilización del biosorbente como aspectos atractivos adicionales que ofrece la biosorción.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Se realizó una recopilación de los trabajos publicados entre los años 2010 y 2020. Se utilizó como bases de datos *Science Direct*, y las palabras clave utilizadas para la búsqueda fueron: "Sorption + algae", "Biosorption + algae", "Biosorption + metal", "Biosorption + algae + metal".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pretratamientos químicos

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de biosorción, puede haber contaminación secundaria debido a la lixiviación de la materia orgánica de la biomasa. Para prevenirla, se puede aplicar un pretratamiento con agentes químicos. Estos modifican la superficie adsorbente, aumentan su estabilidad y su capacidad de adsorción (Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014; Montazer-Rahmati et al, 2011). Además, evitan que se produzca una brusca variación del pH a lo largo del proceso, lo que podría alterar la carga de los compuestos de la pared de las algas y, por ende, la eficiencia de la biosorción (Plaza Cazón et al, 2012). Cabe destacar que, en general, los agentes químicos empleados en el pretratamiento no significan un costo adicional elevado.
En la literatura se reportó el uso de distintos agentes químicos; entre ellos: bases (Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014; Rizwan et al, 2018), ácidos (Montazer-Rahmati et al, 2011; Rizwan et al, 2018), sales (Montazer-Rahmati et al, 2011; Rizwan et al, 2018; Plaza Cazón et al, 2012) y sustancias orgánicas (Montazer-Rahmati et al, 2011).
En la investigación realizada por Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014, se compararon los resultados de remoción de Pb(II), Zn(II) y Co(II) con *Ulva lactuca* intacta (sin pretratamiento) y con un pretratamiento alcalino con solución de NaOH 0,6 M (ver Tabla I). Los resultados muestran que el tratamiento alcalino mejoró la capacidad de biosorción de la macroalga para todos los metales estudiados. El incremento de las capacidades máximas de biosorción fue de 94,31%, 43,60% y 37,40%, para Co(II), Pb(II) y Zn(II), respectivamente.

Tabla I. Resultados de la biosorción de Co(II), Pb(II) y Zn(II) con *Ulva lactuca* a pH 5,5 y temperatura 22°C. Datos extraídos de Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014.

Metal	Pretratamiento	$Q_{máx}$ (mmol g^{-1})
Co(II)	-	0,2406
Co(II)	NaOH 0,6 M	0,4675
Pb(II)	-	0,4538
Pb(II)	NaOH 0,6 M	0,6521
Zn(II)	-	0,5012
Zn(II)	NaOH 0,6 M	0,6886

El análisis por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) indicó que el pretratamiento alcalino modificó las bandas de absorción correspondientes a los grupos carboxilo e hidroxilo. Esto sugeriría que el tratamiento con solución alcalina genera reacciones de hidrólisis, que conducen a la formación de grupos hidroxilo (-OH) y carboxilo (-COOH). Como consecuencia, los grupos superficiales inactivos se transforman en grupos funcionales disponibles para interaccionar con los metales, con lo cual, aumenta la capacidad de adsorción (Bulgariu, L., and Bulgariu, D., 2014). Además, los autores indican que luego del tratamiento básico, la lixiviación de los compuestos orgánicos de la biomasa disminuye, lo que reduce los riesgos de contaminación secundaria.

En el trabajo publicado por Montazer-Rahmati et al, 2011, se estudió la biosorción de Cd(II), Ni(II) y Pb(II) utilizando cuatro especies de macroalgas pardas con y sin pretratamiento: *Cystoseira indica*, *Sargassum glaucescens*, *Nizimuddinia zanardini* y *Padina australis*. Ellos evaluaron cinco agentes distintos: 0,1 M $CaCl_2$, 0,1 M HCl, formaldehído (FA), glutaraldehído (GA) y polietilenimina (PEI) (ver Tabla II). Se obtuvieron los mejores resultados con *C. indica* pretratada con FA para Cd (II), Ni (II) y Pb (II); con *N. zanardini* con FA para Ni (II) y Pb (II); *P. australis* con FA para Pb (II) y con *S. glaucescens* con FA para Ni (II) y Pb (II). Los otros metales tuvieron afinidades distintas dependiendo el alga y el agente de pretratamiento considerados. La biosorción depende de los grupos funcionales presentes en la biomasa, lo que explica diferencias en la remoción de los metales. En ningún caso el biosorbente intacto obtuvo la mayor remoción, por lo que podría afirmarse que el pretratamiento aumenta la adsorción de los metales.

Tabla II. Resultados de la biosorción de Cd(II), Ni(II) y Pb(II) con macroalgas pardas a pH 5,5 y temperatura 25°C. Datos extraídos de Montazer-Rahmati et al, 2011.

	Cystoseira indica		***Nizimuddinia zanardini***	
	Pretratamiento	**Qm (mg g^{-1})**	**Pretratamiento**	**Qm (mg g^{-1})**
Cd (II)	-	8,35	-	4,04
Cd (II)	$CaCl_2$	18,92	$CaCl_2$	18,17
Cd (II)	FA	19,42	FA	17,17
Cd (II)	GA	17,74	GA	17,09
Cd (II)	HCl	12,72	HCl	9,06
Cd (II)	PEI	6,79	PEI	8,66
Ni (II)	-	7,00	-	6,38
Ni (II)	$CaCl_2$	7,35	$CaCl_2$	4,90
Ni (II)	FA	10,06	FA	6,60
Ni (II)	GA	9,03	GA	6,50
Ni (II)	HCl	9,32	HCl	6,41
Ni (II)	PEI	8,99	PEI	6,30
Pb (II)	-	47,22	-	50,41
Pb (II)	$CaCl_2$	50,36	$CaCl_2$	51,70
Pb (II)	FA	51,31	FA	51,83
Pb (II)	GA	41,44	GA	46,23
Pb (II)	HCl	33,77	HCl	39,73
Pb (II)	PEI	32,41	PEI	32,51
	Padina australis		***Sargassum glaucescens***	
	Pretratamiento	**Qm (mg g^{-1})**	**Pretratamiento**	**Qm (mg g^{-1})**
Cd (II)	-	3,49	-	4,23
Cd (II)	$CaCl_2$	17,27	$CaCl_2$	18,66

 ISBN 978-987-1323-66-1

Cd (II)	FA	16,81	FA	14,50
Cd (II)	GA	17,40	GA	17,23
Cd (II)	HCl	8,74	HCl	9,65
Cd (II)	PEI	7,70	PEI	7,43
Ni (II)	-	5,96	-	6,35
Ni (II)	$CaCl_2$	6,91	$CaCl_2$	6,26
Ni (II)	FA	4,06	FA	8,10
Ni (II)	GA	7,01	GA	7,81
Ni (II)	HCl	6,86	HCl	6,72
Ni (II)	PEI	7,40	PEI	6,66
Pb (II)	-	46,51	-	45,84
Pb (II)	$CaCl_2$	48,25	$CaCl_2$	49,58
Pb (II)	FA	50,62	FA	51,25
Pb (II)	GA	45,21	GA	42,69
Pb (II)	HCl	35,32	HCl	35,53
Pb (II)	PEI	32,14	PEI	31,92

Efecto del pH

El pH de la solución tiene un papel fundamental en la biosorción debido a distintos efectos: (a) especiación de los metales y (b) carga superficial de los grupos funcionales del biosorbente (Yipmantin et al, 2011).

En primer lugar, debe destacarse que la biosorción se realiza a pHs ácidos, ya que, bajo condiciones básicas, los metales precipitan y se podrían sobreestimar los resultados de la biosorción.

Por otro lado, en función del pH de la solución, los grupos funcionales presentes en la pared celular de la biomasa pueden protonarse o desprotonarse. A pH menor al pKa de la biomasa, la adsorción es menor ya que los sitios de unión están ocupados por protones y hay repulsión electrostática entre estos y los metales cargados positivamente. Al incrementar el pH, aumenta la desprotonación de los grupos funcionales y entonces, la adsorción de los iones metálicos. Este aumento de la adsorción con el pH continúa hasta dar con el pH óptimo. A pH mayores al pH óptimo, la biosorción disminuye (Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010; Areco et al, 2012; Ibrahim, W.M., 2011).

La dependencia con el pH es más acentuada para algunos metales. Por ejemplo, en el estudio de Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010, se observó que la biosorción de Pb(II) exhibió una ligera dependencia del pH, mientras que el Zn(II), Cd(II) y Cu(II) mostraron una relación mayor (ver Fig. 1). Esto evidencia la importancia de encontrar el pH óptimo en función del adsorbente y adsorbato.

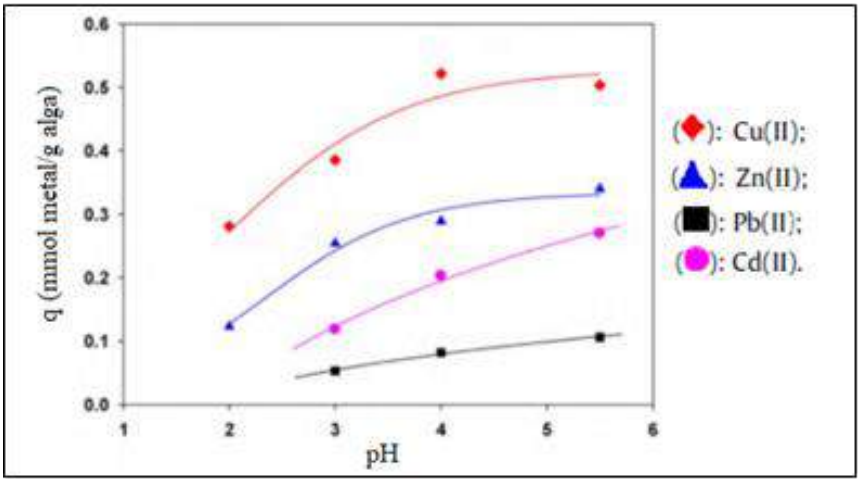


Figura 1. Biosorción de Cu(II), Zn(II), Pb(II) y Cd(II) con *Gymnogongrus torulosus* a temperatura ambiente. Extraída de Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010.

Por otro lado, se reportó que la influencia del pH en la adsorción fue mayor para el caso de la biomasa tratada. Por ejemplo, Plaza Cazón et al, 2012, observaron que durante la biosorción de Cd(II), el pH aumentó significativamente en el caso de la biomasa no tratada y se mantuvo prácticamente constante cuando el biosorbente se pretrató con una solución 0,2 M de $CaCl_2$. Esto muestra que, el pretratamiento químico amortiguaría la variación de pH a lo largo del proceso, lo que podría estar relacionado a la reducción de la lixiviación de los grupos funcionales con pKa en el rango de 3 a 4,4, como, por ejemplo, los carboxilos (Plaza Cazón et al, 2012).

Cinética de la adsorción

Para dilucidar los mecanismos de adsorción y optimizar los parámetros experimentales, es pertinente analizar la cinética del proceso (Plaza Cazón et al, 2012).

El modelo de pseudo-segundo orden obtuvo buenos ajustes de los resultados experimentales (Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010; Areco et al, 2012; Boschi et al, 2011; Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014; Plaza Cazón et al, 2012; Montazer-Rahmati et al, 2011; Yipmantin et al, 2011).

Otro aspecto importante es identificar los pasos limitantes de la velocidad. En el artículo de Plaza Cazón et al, 2012, se comparó la biosorción de Zn(II) y Cd(II) empleando *Macrocystis pyrifera* no pretratada (intacta) y pretratada con 0,2 M $CaCl_2$. En el caso de la biomasa intacta, se obtuvo que tanto la resistencia a la difusión de la interfaz como la difusión intrapartícula intervienen en la cinética del proceso de biosorción de Cd(II) y Zn(II). Los pasos limitantes de velocidad de la adsorción con la biomasa no pretratada coinciden con los propuestos por Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010, y Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014. En cambio, con la biomasa pretratada, la resistencia a la difusión no fue el paso predominante en el control de la cinética. Esto indicaría que el pretratamiento de la biomasa con $CaCl_2$ mejoró la estabilidad del biosorbente y limitó los efectos de la resistencia a la difusión, mejorando la eficiencia del proceso (Plaza Cazón et al, 2012).

En el estudio publicado por Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014, se obtuvieron valores más altos de las constantes cinéticas en el caso de *Ulva lactuca* pretratada con NaOH 0,6 M, en comparación con los de la biomasa no pretratada. Esto sugeriría que la velocidad del proceso de biosorción se ve limitada, al menos parcialmente, por la disponibilidad de grupos funcionales superficiales que interaccionan con los metales disueltos en solución acuosa. La aplicación del modelo de difusión intrapartícula indicó

que no hay una única limitación al proceso de biosorción, tanto como para el biosorbente tratado como para el "intacto".

Efecto del tiempo de contacto

Los estudios realizados por Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010; Areco et al, 2012 y Montazer-Rahmati et al, 2011, sugieren que la adsorción ocurre más rápidamente durante las primeras horas y luego alcanza una meseta, tras la cual el proceso continúa sin variaciones significativas. Esto indicaría que, a medida que los sitios de unión se ocupan, los metales adsorbidos repelen otros iones. Cabe destacar que la tasa de adsorción varía para cada metal y adsorbente. Una mayor tasa de biosorción indicaría mayor preferencia del biosorbente por el ión (Areco et al, 2012).

Por su parte, Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014, compararon los resultados cinéticos obtenidos para *Ulva lactuca* intacta y pretratada con 0,6 M NaOH. La velocidad de adsorción fue mayor cuando utilizaron el biosorbente pretratado. En el caso de la macroalga sin pretratar, se removió alrededor de 80% de Co(II), Pb(II) y Zn (II) en los primeros 30 minutos. En cambio, para la macroalga modificada con NaOH, en los primeros 5 minutos los porcentajes de remoción fueron mayores al 85% para los mismos metales. El tiempo de equilibrio también disminuyó: de 60 minutos para la biomasa no tratada a 30 minutos para la macroalga modificada alcalinamente, lo que indica que el pretratamiento no solo aumenta la eficiencia de la adsorción sino también, la velocidad del proceso (Bulgariu and Bulgariu, 2014).

En cambio, Plaza Cazón et al, 2012, encontraron que el tratamiento de la biomasa no favoreció la velocidad del proceso.

Efecto de la temperatura

La temperatura es otra variable que puede favorecer o perjudicar la biosorción. La capacidad de adsorción disminuye al aumentar la temperatura, lo que indicaría que la naturaleza del proceso es exotérmica (ver Fig. 2). Además, bajo temperaturas muy elevadas ocurre el deterioro del material adsorbente (Ata et al, 2012). En el artículo publicado por Areco, M.M. and Dos Santos Afonso, M., 2010, se observó que el incremento de la temperatura de (7 a 25)°C, aumentó la constante cinética de la biosorción de Cd(II), Cu(II), Pb(II) y Zn(II). Sin embargo, cuando la temperatura aumento de (25 a 55)°C disminuyó, indicando que a estos valores se comprometerían las estructuras de los compuestos superficiales.

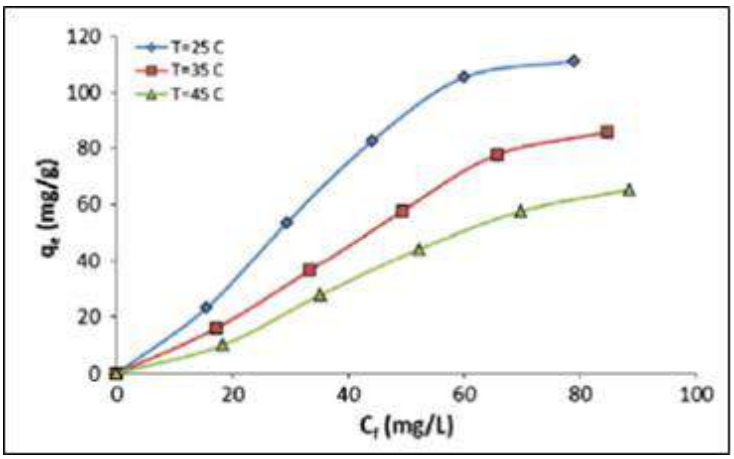


Figura 2. Isotermas de adsorción de Cr (VI) con *Gracilaria verrucosa*. Extraída de Ata et al, 2012.

Se obtuvieron resultados similares respecto a la variación de la temperatura con la biomasa pretratada. Para la biosorción de Cd(II) con dos macroalgas pardas tratadas con

$CaCl_2$ a pH 6, el aumento de (20 a 30)°C aumentó la capacidad de adsorción, mientras que una variación de (30 a 40)°C disminuyó la captación del metal (ver Tabla III) (Boschi et al, 2011).

Tabla III. Resultados de la biosorción de Cd (II) con dos macroalgas pardas a pH 6. Datos extraídos de Boschi et al, 2011.

	$Q_{máx}$ [mg g^{-1}]	
Temperatura [°C]	***Lessonia nigrescens***	***Lessonia trabeculata***
20	107,4	165,5
30	115,8	138,1
40	103,4	120,2

Recuperación del adsorbato y reutilización del biosorbente

Otro aspecto atractivo y ventajoso de la técnica es la posibilidad de recuperar los metales adsorbidos y reutilizar el biosorbente. Esto se logra desorbiendo los metales con la aplicación de reactivos químicos. Como consecuencia, se consigue una disminución del costo del proceso, una reducción del volumen de los desechos y, si se lograran aprovechar los metales recuperados, una menor demanda de la extracción de estos materiales (Areco et al, 2012).

Existen una gran variedad de agentes desorbentes. Es conveniente utilizar una sustancia que no degrade y tampoco dañe la biomasa para preservar su capacidad de biosorción y poder reutilizarla (Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014).

En la investigación de Plaza Cazón et al, 2012, se compararon distintas soluciones de HNO_3, EDTA y $Ca(NO_3)_2$, como agentes de desorción de Cd(II) y Zn(II). Las soluciones de HNO_3 y EDTA 0,1 M alcanzaron una desorción casi completa (99-100)% de Cd(II) y Zn(II) (ver Fig. 3). Sin embargo, mientras que las soluciones de HNO_3 permitieron recuperar los metales sin dañar la biomasa, el EDTA la destruyó por completo.

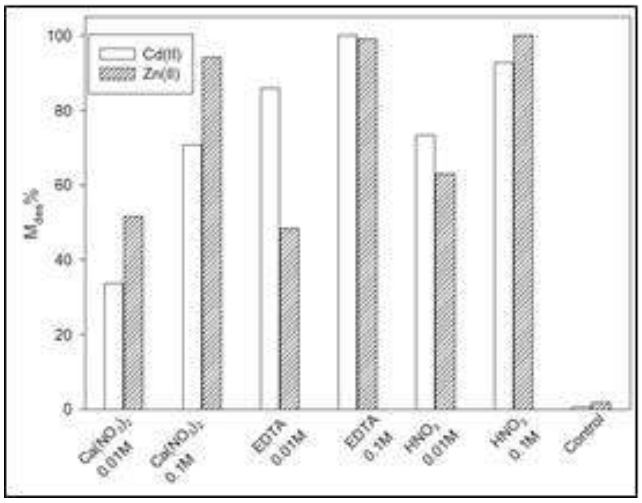


Figura 3. Desorción de Cd(II) y Zn(II) utilizando *Macrocystis pyrifera* tratada con distintos eluyentes, a pH 5 y 20°C. Extraída de Plaza Cazón et al, 2012.

En el artículo publicado por Montazer-Rahmati et al, 2011, se utilizaron distintas soluciones ($CaCl_2$ 0,1M; CH_3COOH 0,1M y NaCl 0,1M) para desorber Cd(II), Ni(II) y Pb(II). Los autores encontraron que los mejores resultados se obtuvieron con la solución de $CaCl_2$. En el trabajo realizado por Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014, se evaluó la desorción de Pb(II), Zn(II) y Co(II) con diferentes soluciones de HCl, obteniéndose con la solución 0,1 M, una recuperación de 97,5% 98,02% y 98,13%, para Pb(II), Zn(II) y Co(II), respectivamente.

Una forma de evaluar la capacidad de adsorción del biosorbente reutilizado es a través de ciclos sucesivos de adsorción y desorción. Montazer-Rahmati et al, 2011, encontraron que la capacidad de biosorción de las macroalgas pardas utilizadas no varió significativamente luego de cinco ciclos de biosorción-desorción. Este resultado, indicaría que se trata de un material muy noble, que puede ser reutilizado numerosas veces, sin perder su capacidad de remoción. Por su parte, Bulgariu, L. and Bulgariu, D., 2014, registraron una disminución en la capacidad de biosorción cercana al 3,5% para Pb(II), 5,7% para Zn(II) y 6,2 % para Co(II), luego de reutilizar tres veces el material. Esta reducción estaría relacionada a la precipitación de los metales, o bien a la complejación irreversible de algunos grupos funcionales presentes en la superficie de las algas (Areco et al, 2012).

CONCLUSIONES

La biosorción con macroalgas obtuvo buenos resultados en la remoción de metales de soluciones artificiales, es decir, preparadas en el laboratorio. Por este motivo, surgen expectativas por aplicar la técnica en muestras naturales o efluentes industriales reales. Sin embargo, estas matrices son más complejas que las artificiales, debido a la presencia de múltiples metales disueltos simultáneamente, que generan fenómenos de competencia por los sitios de unión del adsorbente, que podrían disminuir las capacidades de remoción.

Por este motivo, se necesita profundizar sobre las formas de optimización del método y realizar más estudios sobre muestras complejas. En este sentido, el pretratamiento se postula como una opción para aumentar la capacidad de adsorción de las macroalgas y permitirles de esta manera, superar su desafío como biosorbentes.

REFERENCIAS

Areco, M.M and Dos Santos Afonso, M. Copper, zinc, cadmium and lead biosorption by *Gymnogongrus torulosus*. Thermodynamics and kinetics studies. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 81, 620-628 (2010).

Areco, M.M., Hanela, S., Duran, J. and Dos Santos Afonso, M. Biosorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) by dead biomasses of green alga *Ulva lactuca* and the development of a sustainable matrix for adsorption implementation. *Journal of Hazardous Materials* 213-214, 123-132 (2012).

Ata, A.; Nalcaci, O.O.; Ovez, B. Macroalgae Gracilaria verrucosa as a biosorbent: A study of sorption mechanisms. *Algal Research* 1, 194-204 (2012).

Boschi, C., Maldonado, H., Ly, M., and Guibal, E. Cd(II) biosorption using *Lessonia* kelps. *Journal of Colloid and Interface Science* 357, 487–496 (2011).

Bulgariu, L. and Bulgariu, D. Enhancing biosorption characteristics of marine green algae (*Ulva lactuca*) for heavy metals removal by alkaline treatment. *J. Bioprocess. Biotech.* 4 (2014).

Cheng, S.Y., Show, P.L., Lau, B.F., Chang, J.S., Ling, T.C. New Prospects for Modified Algae in Heavy Metal Adsorption. *Trends in Biotechnology* 37, 1255-1268 (2019).

Ibrahim, W.M. Biosorption of heavy metal ions from aqueous solution by red macroalgae. *Journal of Hazardous Materials* 192, 1827-1835 (2011).

Michalak, I., Chojnacka, K., and Witek-Krowiak, A. State of the Art for the Biosorption Process—a Review. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 170, 1389-1416 (2013).

Montazer-Rahmati, M.M., Rabbani, P., Abdolali, A. and Keshtkar, A.R. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of cadmium, lead, and nickel ions from aqueous solutions by intact and chemically modified brown algae. *Journal of Hazardous Materials* 185, 401–407 (2011).

Moreira V.R., Lebron Y.A.R., Lange, L.C. and Santos, L.V.S. Simultaneous biosorption of Cd(II), Ni(II) and Pb(II) onto a brown macroalgae *Fucus vesiculosus*: Mono- and multi-

component isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Management* 251, 109587 (2019).

Plaza Cazón, J., Bernardelli, C., Viera, M., Donati, E. and Guibal, E. Zinc and cadmium biosorption by untreated and calcium-treated *Macrocystis pyrifera* in a batch system. *Bioresource Technology* 116, 195–203 (2012).

Plaza, J., Viera, M., Donati, E. and Guibal, E. Biosorption of mercury by *Macrocystis pyrifera* and *Undaria pinnatifida*: Influence of zinc, cadmium and nickel. *Journal of Environmental Sciences* 23, 1778-1786 (2011).

Rizwan, M.; Naz, A.; Khan, A.; Shah, W.; Mujtaba, G.; Syed, M.; Ahmed, Q: Fatima, N. Role of Pretreatment in Adsorption of Cobalt, Mercury and Nickel by Native Algae. *Frontiers in Water-Energy-Nexus* 2, 521-523 (2018).

Santos, S.C.R., Ungureanu,G., Volf, I., Boaventura, R.A.R. and Botelho, C.M.S. *Biomass as Renewable Raw Material to Obtain Bioproducts of High-Tech Value*, Elseiver, 2018.

Yipmantin, A., Maldonado, H.J., Ly, M., Taulemesse, J.M. and Guibal, E. Pb(II) and Cd(II) biosorption on *Chondracanthus chamissoi* (a red alga). *Journal of Hazardous Materials* 185, 922-929 (2011).

MODELADO 3D DE FRACTURAS HIDRÁULICAS EN MACIZOS ROCOSOS

Fuentes N. O.[a,b]

[a] *Departamento ICES, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, CAC, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA*
[b] *Institutode Tecnología"Prof. Jorge A. Sabato", Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*

e-mail: fuentes@cnea.gov.ar

RESUMEN

Las formaciones rocosas fracturadas poseen una gran variedad de propiedades hidrogeológicas, sin embargo la importancia relativa de las mismas está íntimamente relacionada con la aplicación específica a la cual se pretenda destinar el sitio. Por un lado, en los casos de explotación de reservorios asociados a recursos energéticos como petróleo o gas, se prefieren sistemas de fracturas bien interconectados y de alta permeabilidad con una matriz que posea buena porosidad y permeabilidad. En cambio, para su empleo como lugar de disposición final de residuos radiactivos se requieren las características opuestas, es decir, fracturas dispersas con pobre conectividad y una matriz de permeabilidad baja. Si bien los procesos en los cuales una presión hidráulica genera el inicio y propagación de fracturas, "fracking", pueden producirse en forma natural, este proceso es el elegido para el caso de explotación de recursos energéticos en formaciones de esquistos. En este trabajo, con el objetivo de contar con herramientas que nos permitan obtener un mejor conocimiento del comportamiento de este proceso y, a la vez poder simular, predecir y prevenir posible contaminación de recursos subterráneos, se ha elaborado un modelo en 3D que extiende trabajos recientes. El modelo que se presenta permite simular la fracturación en tres dimensiones. A partir de incrementos en la presión generada por un fluido, para generar las fracturas se utiliza un esquema de evolución dinámica del modelo de "redes de fusibles aleatorios" ("random-fuse network, RFN") que permite incorporar la evolución de los procesos irreversibles de ruptura de la roca. El daño interno evoluciona siguiendo una relación potencial con el campo de esfuerzos a que está sometida el área considerada. El modelo aquí presentado nos permite contar con un código numérico para realizar estimaciones y predicciones, constituyendo la base de futuras aplicaciones específicas a sitios de interés determinado.

Palabras Claves: Macizos rocosos, Fracturas, Fracturas hidráulicas, Modelos 3D.

INTRODUCCIÓN

La zona no saturada ("vadose zone") constituye una importante región en el estudio de diferentes disciplinas e investigaciones. Además de su significación económica por ser la zona donde se desarrollan los cultivos que reciben de ella agua y nutrientes a través de sus raíces, adquiere relevancia por ser la zona que separa y protege a los cursos subterráneos de agua de la contaminación por agentes químicos y patógenos del medioambiente. Más aún, es una zona donde se depositan residuos de centros poblados y no siempre en forma planificada. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de investigaciones interdisciplinarias que se han desarrollado sobre esta zona, todavía no se

ha logrado una caracterización rigurosa de sus propiedades de transporte, retención y reacción.

Si, en particular, se encara el estudio de la zona no saturada ("vadose zone") en regiones áridas o semiáridas, el panorama debe completarse incluyendo las dificultades propias de la caracterización de las rocas fracturadas. Las formaciones rocosas fracturadas poseen una gran variedad de propiedades hidrogeológicas, sin embargo la importancia relativa de las mismas está íntimamente relacionada con la aplicación específica a la cual se pretenda destinar el sitio. Por un lado, en los casos de explotación de reservorios asociados a recursos energéticos como petróleo o gas, se prefieren sistemas de fracturas bien interconectados y de alta permeabilidad con una matriz que posea buena porosidad y permeabilidad. En cambio, para su empleo como lugar de disposición final de residuos radiactivos se requieren las características opuestas, es decir, fracturas dispersas con pobre conectividad y una matriz de permeabilidad baja.

Más allá de las dificultades existentes para obtener un adecuado conocimiento de los procesos físicos, químicos, hidro-termo-mecánicos involucrados en la evolución del comportamiento de un macizo de roca fracturada, también se tienen huecos en el conocimiento teórico sobre la zona no saturada ("vadose zone").

En tal sentido, las interacciones acopladas de los distintos flujos a través de esta zona no son completamente comprendidas, imposibilitando la elaboración de modelos que permitan incluir todas las variables involucradas prescindiendo de las aproximaciones y simplificaciones en las ecuaciones empleadas hasta el momento. Más aún, la diversidad de los posibles procesos transitorios presentes, unida al hecho que aquellas propiedades del medio realmente importantes para el transporte son siempre no estacionarias, hacen que los flujos y procesos de transporte en la zona no saturada raramente alcancen el estado estacionario. Por otra parte, a fin de encarar descripciones teóricas debe tenerse presente que los cambios de temperatura y presión atmosférica inciden en las modificaciones de los sistemas ecológicos sobre el terreno. Por tal motivo, la caracterización de flujos y regímenes de transporte requiere una descripción basada en múltiples fases. Las fases que resultan de interés para zonas no saturadas en rocas fracturadas incluyen flujos de agua y gas, agua y una fase no acuosa, agua y vapor y, en especial, los procesos de filtraciones. Por último, y no por ello menos importante desde el punto de vista numérico, la extrema variabilidad espacial y temporal de los flujos y las propiedades de transporte, provocan una gran demanda de datos tanto en modelos estocásticos como determinísticos.

El panorama anterior se complica cuando, además, se pretende tener en cuenta el comportamiento del macizo de roca fracturada. En tal sentido, si bien los procesos de rotura y propagación de fracturas es conocido, su descripción detallada es compleja, inclusive, en medios homogéneos. Es por ello que, favorecidos por el avance de los medios computacionales de cálculo, en los modelos elaborados en los últimos cincuenta años, se ha evolucionado desde aproximaciones a partir de simplificaciones del medio fracturado y de las ecuaciones a resolver para los fluidos, hasta la inclusión en forma paulatina de más efectos interactuando en forma simultánea. En muchos casos, se ha avanzado acoplando diferentes modelos comerciales a fin de obtener en forma sucesiva e interactiva el cálculo de la evolución de las fracturas, con un código, y el flujo y transporte de fluidos empleando otro paquete de programas.

En este trabajo, y con el objetivo de contar con herramientas que nos permitan obtener un mejor conocimiento del comportamiento de la zona no saturada ("vadose zone") en terrenos de rocas fracturadas, y a la vez poder simular, predecir y prevenir posible

contaminación de recursos subterráneos, se ha elaborado un modelo en tres dimensiones con arquitectura modular. El primero de los módulos calcula la aparición y propagación de fracturas como consecuencia directa de la acción combinada del campo de tensiones existente en el macizo, más las nuevas tensiones introducidas por los factores ambientales y el movimiento de fluidos inyectados a través de la zona no saturada. El segundo módulo corresponde al movimiento de fluidos que penetra en las fracturas producidas y en ellas ejerce también presión. Cada módulo interactúa con el otro a fin de actualizar los datos de entrada para las sucesivas corridas.

En el presente trabajo se incluye una descripción de las ecuaciones empleadas en los módulos del modelo, y se brindan algunos ejemplos de simulaciones realizadas bajo distintas condiciones físicas.

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En todos los módulos del código se emplea para describir la acción del fluido inyectado la siguiente expresión de la ecuación de Navier-Stokes - Duhem:

$$\rho d\mathbf{u}/dt = -\nabla p + (\lambda+\mu)\,\nabla(\nabla.\mathbf{u}) + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \rho\mathbf{b} \qquad (1)$$

donde d**u**/dt es la derivada total o material del campo de desplazamientos que produce la fuerza resultante debida al fluido; λ y μ son los coeficientes de Lamé que dan cuenta de los efectos viscosos del fluido empleado; ρ es la densidad de masa; ∇ p da los gradientes de presiones asociados a las presiones de inyección del fluido; $\rho\mathbf{b}$ representa a todas las fuerzas por unidad de volumen propias de la masa del fluido, típicamente es el peso del mismo.

Los tres primeros términos del miembro derecho de la Ec. 1 representan el gradiente del tensor de esfuerzos viscosos, $\nabla\sigma$, debidos a la acción del fluido inyectado y que actúa en el medio de roca fracturada. Para el caso de simular la aparición de fracturas con su consiguiente propagación, se usa la siguiente relación para calcular la evolución del daño interno , d$\boldsymbol{D}_n$/dt,

$$d\boldsymbol{D}_n/dt = g_n^{-1}\,\sigma_n^{\,m} - a_n\boldsymbol{D}_n \qquad (2)$$

con el campo de esfuerzos σ_n sobre el elemento n, a que está sometida el área considerada; siendo g_n una constante elástica y a_n una constante que depende del valor asintótico del daño.

Las dos ecuaciones anteriores son discretizadas y empleadas en una grilla cúbica que representa el terreno a estudiar. Para todos los casos presentados aquí se utilizó un simple esquema de diferencias finitas para un total de 201 X 201 X 201 puntos.

RESULTADOS

A modo de ejemplo del funcionamiento del modelo aquí presentado, se incluyen a continuación tres situaciones físicas distintas para el caso del flujo de fluidos no reactivo con ρ = 998.3 kg/m^3. En todos los casos para la simulación de las fracturas, las constantes de la Ec. (2) se han variado en forma continua en el intervalo [0.9,1.1]. Como constantes elásticas de uno de los bloques homogéneos empleados se han empleado los datos correspondientes al basalto, E = 62.6 GPa, y ν= 0.25, para el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, respectivamente, y con una tensión de rotura de σ_c = 214.1 MPa. Para el otro bloque empleado en los casos de las Figs. (1) y (2) se han empleado valores un 30% superiores. Con estos valores se ha seguido la evolución temporal

durante 40 horas de inyección de fluido y las filtraciones del mismo a tasa constante de 10^{-3} kg/s que infiltra las rocas fracturadas. En los dos primeros ejemplos presentados permite comparar la evolución temporal de la fracturación e infiltración a través de bloques rocosos homogéneos dispuestos verticalmente, en el primer caso, donde el 65 % de las fracturas están orientadas en sentido vertical (Fig. 1) con la situación en que el mismo porcentaje de fracturas está orientado en sentido horizontal (Fig. 2) cuando los bloques homogéneos están dispuestos en forma horizontal.

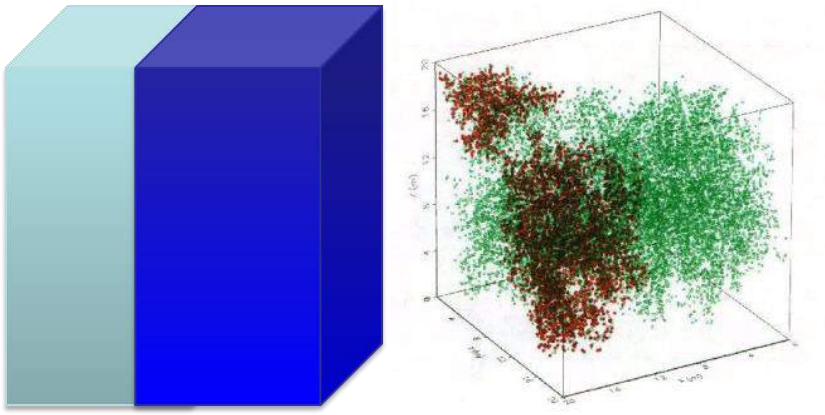


Figura 1. (a) Distribución vertical de los bloques rocosos homogéneos. **(b)** Fracturación con el 65% de los sistemas de fracturas orientados verticalmente.

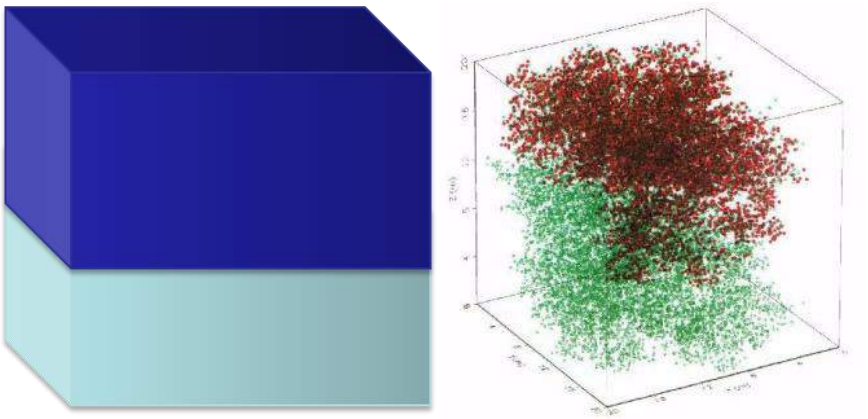


Figura 2. (a) Distribución horizontal de los bloques rocosos homogéneos. **(b)** Fracturación con el 65% de los sistemas de fracturas orientados horizontalmente.

El último ejemplo brinda el comportamiento de las filtraciones cuando no hay una orientación definida en los sistemas de fracturas. Corresponde al caso de un único bloque rocoso homogéneo.

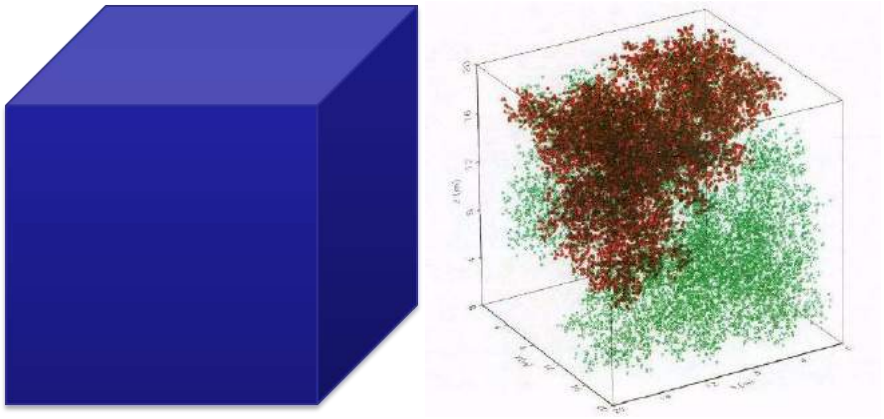


Figura 3. (a) Distribución uniforme del bloque rocosos homogéneo. **(b)**Fracturación sin orientación preferencial para los sistemas de fracturas.

CONCLUSIONES

Las situaciones físicas consideradas en el presente trabajo permiten enfatizar la importancia de emplear las ecuaciones de Navier-Stokes - Duhem en su forma más general, a fin de incluir todos los efectos que se consideren necesarios, sin recurrir a una nueva simplificación de estas ecuaciones. También se pone de manifiesto que aquellas aproximaciones que utilizan cantidades integradas sobre un volumen del terreno no resultan adecuadas para la correcta descripción del flujo no estacionario de fluidos inyectados a través de la zona no saturada. Por otra parte, nuestro modelo confirma observaciones experimentales sobre la existencia de patrones dendríticos que siguen direcciones preferenciales localizadas según las características de los macizos rocosos.

El modelo aquí presentado nos permite contar con un código numérico capaz de realizar estimaciones y predicciones sobre la evolución temporal de la distribución espacial de las fracturas hidráulicas a la vez que tiene en cuenta la infiltración de fluido en las fracturas que se van produciendo. En este sentido, constituye la base de futuras aplicaciones específicas a sitios de interés determinado.

REFERENCIAS

Adachi J, Siebrits E, Peirce A, Desroches J. Computer simulation of hydraulic fractures. *Int J Rock Mech Min Sci*. 44, 739–57 (2007).

Balkema A. A. in Detournay C, Hart R, editors. FLAC and Numerical Modeling in *Geomechanics Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*. Minneapolis. USA (1999).

Firoozabadi, A., and Ishimoto, K. Theory of reinfiltration in fractured porous media: Part I-One-dimensional model. *Advanced Technology Series, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Tex.*, 2(2), 35-44 (1994).

Garagash DI, Detournay E. Plane-strain propagation of a hydraulic fracture: small toughness solution. *J Appl Mech*, 72(6), 916–28 (2005).

Itasca Consulting Group Inc. FLAC-3D Manual: Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions–Version 2.0. *Itasca Consulting Group Inc.*, Minnesota, USA (1997).

Narashimhan T. N, Witherspoon PA. An integrated finite difference method for analysis of fluid flow in porous media. *Water Resour Res.*12, 57–64 (1976).

Peirce AP, Siebrits E. Uniform asymptotic approximations for accurate modeling of cracks in layered elastic media. *Int J Fract*. 110, 205–39 (2001).

Pruess, K., and Narasimhan, T.N. A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media. *Soc. Pet. Eng. J.*, 25(1), 14-26 (1985).

Pruess, K., and Tsang, Y.W. On the two-phase relative permeability and capillary pressure of rough-walled rock fractures. *Water Resour. Res.*, 26(9), 1915-1926 (1990).

Pruess K. TOUGH2—a general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. *Lawrence Berkeley National Laboratory Report* LBL-29400 (1991).

Pruess K. Proceedings of the TOUGH Workshop '98. *Lawrence Berkeley National Laboratory Report* LBNL-41995, Berkeley, CA, USA (1998).

Pruess, K. A mechanistic model for water seepage through thick unsaturated zones in fractured rocks of low matrix permeability. *Water Resour. Res.*, 35(4), 1039-1051 (1999).

Pruess, K., Faybishenko, B., and Bodvarsson, G.S. Alternate concepts and approaches for modeling flow and transport in thick unsaturated zones of fractured rocks. *J. Contam. Hydrol.*, 38, 281-322 (1999).

Rutqvist J, B.orgesson L, Chijimatsu M, Kobayashi A, Jing L, Nguyen TS, NoorishadJ, Tsang C-F. Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models. *Int J Rock Mech Min Sci* , 38, 105–27 (2001).

Siebrits E, Peirce AP. An efficient multi-layer planar 3D fracture growth algorithm using a fixed mesh approach. *Int J Numer Methods Eng*, 53, 691–717 (2002).

Sneddon I. N. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proc R Soc*, 187, 229–60 (1946).

Sornette, D., and Vanneste, C. Dendrites and fronts in a model of dynamical rupture with damage. *Phys. Rev. E* 50, 4327-4345 (1994).

Tsang C-F. Linking thermal, hydrological, and mechanical processes in fractured rocks. *Annu Rev Earth Planet Sci* , 27, 359–84 (1999).

Warren, J.E., and Root, P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J., Transactions, AIME*, 228, 245-255 (1963).

Xu T, Pruess K. Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks 1. Methodol, *Am J Sci* , 301, 16–33 (2001).

Zimmerman R.W., Kumar S, Bodvarsson G. S. Lubrication theory analysis of the permeability of rough-walled fractures. *Int J Rock Mech Min Sci*, 28, 325–31 (1991).

MODELADO FISICOQUÍMICO DE LA BIODEGRADACION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS Y SU COMPARACIÓN CON CASOS REALES EN EL CENTRO OESTE DE ARGENTINA

Gálvez J.[a], Cantero J. [a], Lopez A.[a] , Vardaro S. [a] y Pineda I. [a].

[a] *Bioprocesos. Facultad de Ingenieria. UNCuyo. Centro Universitaria CC405 M5502KFA ARGENTINA*

e-mail: jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

Los contaminantes presentes en el suelo poseen una movilidad determinada que se modifica si se altera la condición del suelo debido a las operaciones de saneamiento y los procesos de tratamiento de los contaminantes. Esta variación de la movilidad, produce un incremento de la dispersión de los mismos. En los procesos de tratamiento de suelos contaminados operan diferentes vías degradatorias: biodegradación, volatilización, lixiviación, retención (absorción y adsorción), reacciones químicas y otras en menor escala. El modelado del proceso de degradación entendido como la disminución de un contaminante orgánico o inorgánico en el suelo permite identificar las distintas vías de reducción del mismos y analizar y cuantificar la posibilidad de migración de contaminantes a otros sistemas ajenos al proceso principal. El método se basó en considerar la contribución de los distintos procesos degradativos y migración de contaminantes mediante ecuaciones basadas en las constantes fisicoquímicas que contribuyen a la migración y compararlas con procesos realizados en sistemas abiertos mediante la técnica de biopilas aireadas por remoción mecánica en el centro oeste de Argentina. De esta forma se logró estimar la masa de hidrocarburo que no se ha biodegradado y ha migrado.

Palabras Clave: Hidrocarburo, Modelo físico químico, Migración, Biotratamiento

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos por técnicas biológicas es una práctica aplicada en el oeste de Argentina en forma experimental entre 1992 y 1996, comenzando su aplicación en gran escala entre 1997 y 1998 hasta nuestros días. Este proceso utiliza la capacidad metabólica de los microorganismos para degradar el hidrocarburo en el suelo en forma aeróbica, lo que constituye un proceso de oxidación (Ercoli et al, 1995a), (Ercoli et al, 1995b), (Ercoli et al, 2000).

Los mismos utilizan el contaminante orgánico como fuente de carbono, para llevar a cabo el proceso, además es necesario incluir una fuente de nitrógeno, fósforo y a veces potasio, además de mantener la humedad en el suelo mediante reacciones de oxidación en su mayor parte. (Ercoli et al, 2000), (La Grega et al, 1996), (Singh et at, 2007).

La biodegradabilidad de un compuesto orgánico varía con la estructura molecular. No todos los compuestos se degradan con la misma facilidad, mientras mayor sea su peso molecular o los átomos no carbonados presentes en su estructura más difícil es el proceso. (Ercoli et al, 2000), (La Grega et al, 1996), (Singh et at, 2007).

Se considera que los hidrocarburos que contienen cadenas de más de 35 átomos de carbono no son biodegradables, independientemente del proceso biológico utilizado (Singh et at, 2007), (Coulon et al, 2010) (TPHCWG 1999).
Las técnicas de tratamiento de suelos que se pueden aplicar en gran escala son: *Landfarming, Biopilas* y *Acumulación aireada*. Las tres técnicas mencionadas operan bajo el concepto de *reactores biológicos en fase sólida* (Singh et at, 2007), (Coulon et al, 2010) (TPHWG, 1999), (Ercoli et al, 2001), (Ercoli et al 2003), (Gálvez et al, 2005).
Los modelos utilizados para la evaluación de riesgo utilizan componentes clave para definir la concentración que en las condiciones del suelo y de exposición definidas determinan la dosis máxima que puede recibir una persona. Esta concentración dependerá no solamente del tipo de hidrocarburo y del suelo sino también del tiempo de exposición. Los componentes claves son Benceno, Tolueno, Etil benceno y Xileno, además de los HAP´s presentes en el suelo. Esta metodología corresponde a la norma ASTM D 1739 (ASTM, 2015) y es la más aplicada en el ambiente petrolero.
En los suelos encontrados en los tratamientos biológicos, y en los lugares de almacenamiento temporario hay presencia de los hidrocarburos considerados cancerígenos y otros cuya toxicidad se está estudiando pero que aún no se incluye en dicha norma. Además en los procesos de biorremediación se modifican las características del suelo tal como la porosidad, el contenido de agua y otros, que modifican el equilibrio entre fases.
Se estudia la aplicación de un modelo que permita determinar influencia de variables relacionadas con la transferencia de materia desde la fase suelo a la fase aire, agua o desde al agua del suelo al aire del mismo y enfocar el estudio de riesgo de migración de contaminante a esa fase.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Técnica de biorremediación

Para llevar a cabo los procesos de biodegradación se seleccionó la técnica de biopilas aireadas por remoción mecánica por ser la más práctica de aplicar en nuestro país (Ercoli et al, 2001), (Ercoli et al 2003), (Gálvez et al, 2005). Para ello se construyeron tres unidades de tratamiento. Las características de las mismas se indican en la Tabla I.
El sitio bajo estudio estuvo al principio sometido a un proceso de tratamiento de suelo contaminado con hidrocarburo por medio de la técnica de landfarming, este procedimiento fue reemplazado posteriormente por biopilas aireadas por remoción mecánica, En el caso registrado el proceso se llevó a cabo con un mínimo de humedad, en donde el aporte de agua para el proceso se debió principalmente a las lluvias.

Toma de muestras

En todas las biopilas se tomaron muestras ponderadas compuestas de 5 muestras puntuales cada una. De esta forma se tomaron dos muestras por biopila una correspondiente a la zona superior y otra correspondiente a la zona inferior. Las muestras para determinación de hidrocarburos se colocaron en frascos de vidrio y se llevaron refrigeradas al laboratorio.

Tabla I. Datos físico químicos y dimensionales de las biopilas

Parámetro	Biopila 1	Biopila 2	Biopila 3
Volumen total (m^3)	11862	7691	7767
Superficie externa (m^2)	8988	6116	6168
Textura	Franco arenoso		
Densidad	1,05		
Porosidad	0,52		
Fracción de agua del suelo	0,14		
Contenido de materia orgánica (%)	2		
Volumen de fase sólida (m^3)	5694	3692	3738
Volumen de fase agua (m^3)	1661	1077	1087
Volumen de fase aire (m^3)	4500	2922	2550

Técnicas analíticas

Los métodos analíticos para determinación de Hidrocarburos fueron los siguientes (Cantero et al, 2005), (Von Fanestock, 1998):

- Hidrocarburos totales de petróleo: EPA 418.1. Esta técnica permite detectar hidrocarburos hasta compuestos de 65 o más átomos de carbono, pero no puede identificar componentes.
- Hidrocarburos cromatografiables: TNRCC 1006, determina los hidrocarburos por fracciones en función del número de átomos de carbono. Permite cuantificar e identificar compuestos hasta 35 átomos de carbono. Discrimina entre alifáticos y no alifáticos.
- Destilación simulada basada en EPA 8015, sirve para determinar los compuestos que son retenidos en el inyector del cromatógrafo.

Los métodos analíticos para el seguimiento de nutrientes en el proceso de biorremediación fueron:

- Nitrógeno edáfico: Método modificado para suelos contaminados basado en Mét. Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales 4500-Norg B Mét Macro-kjeldahl. Análisis químicos de suelos, Jackson 3ªEd.
- Fósforo asimilable: Método de Fósforo absorbido Bray-P1 (6S) Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations Report Nº42, Version 3.0. January 1996.
- Microorganismos Aerobios Degradadores de Hidrocarburos: Método modificado para suelos contaminados con Hidrocarburos. Methods of soil analysis-Part2-Chemical and Microbiological Properties. Second Edition. American Society of Agronomy, Inc.1982.
- PH: en suelos y residuos: Método EPA SW 9045C
- Textura: IRAM 10509:1982
- Conductividad de suelos: USDA, Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. 1999

Desarrollo del proceso de tratamiento:

Se indica la concentración de hidrocarburos de las biopilas que se designaron como 1, 2 y 3 (Tabla II). Los datos indicados son los que corresponden al periodo de tratamiento completo llevado a cabo en el sitio (se incidan los promedios de análisis realizados por triplicado).

Tabla II. Concentración de hidrocarburos totales de petróleo medidos por EPA 418.1.

Tiempo	Concentración de hidrocarburos totales (g/kg)		
	Biopila 1	Biopila 2	Biopila 3
0	26,3	15,8	20,38
3,73	19,23	12,21	12,94
5,37	20,77	12,5	17,73
7,07	15,7	11	17,83
9,60	12,69	-	12,00
10,53	11,66	-	7,23

En este caso se consideró que hay una fracción no degradable en el hidrocarburo medida por esta técnica. Por ello se trabajó con el resultado de caracterización inicial del hidrocarburo en cada biopila de las fracciones determinable por cromatografía mediante técnica TNRCC 1006, (TPHCWG, 1999). La misma se indica en la Tabla III.

Tabla III. Contenido de Hidrocarburos según norma TNRCC 1006. (TPHCWG, 1999)

Fracción	Biopila 1	Biopila 2	Biopila 3
Alifática (g/kg)			
C5-C6	0,01288485	0,007821	0,0100881
C6-C8	0,30294859	0,18388735	0,23719141
C8-C10	1,24256339	0,75422596	0,97285601
C10-C12	0,87583479	0,53162465	0,68572851
C12-C16	2,6557222	1,61200195	2,07927847
C16-C35	9,03140368	5,48198917	7,07107211
Aromática (g/kg)			
C5-C6	0,00855554	0,00519314	0,0066985
C6-C8	0,13869253	0,08418524	0,10858831
C8-C10	0,23476197	0,14249862	0,18380518
C10-C12	0,14750576	0,08953481	0,11548857
C12-C16	0,13018852	0,07902338	0,10193016
C16-C21	0,10034721	0,06090995	0,07856612
C21-C35	0,06019802	0,03653971	0,0471316

MODELO DE MIGRACIÓN DE CONTAMINANTES

Se estudia la aplicación de un modelo que permita determinar la sensibilidad del suelo a variables relacionadas con la transferencia de materia desde la fase suelo a la fase aire, agua o desde al agua del suelo al aire del mismo, y enfocar el estudio de riesgo a esa fase.

Modelo conceptual de migración

El modelo conceptual de migración en el suelo contaminado se muestra en la figura I (Coulon et al, 2010), (Devillers et 2007)

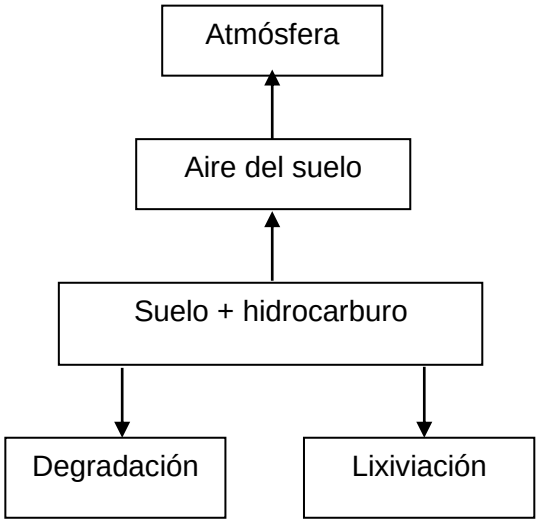


Figura I. Esquema conceptual de migración

Las condiciones ambientales requeridas para la biodegradación hacen que el proceso biológico se lleve a cabo en fase acuosa, por lo que sólo se considerará la fase acuosa para este propósito. Se considera al suelo que forma la biopila o el material del repositorio compuesto por tres fases: suelo con hidrocarburo, aire del suelo y agua del suelo.

Etapas principales en cada transferencia

Suelo más hidrocarburo a agua de suelo: difusión a través del poro de suelo (difusión retardada por sorción), disolución en la fase acuosa.

Suelo más hidrocarburo a aire del suelo: difusión a través del poro de suelo y evaporación.

Agua de suelo: recibe los hidrocarburos del suelo, en ella se realiza la biodegradación y evaporación, el resto lixivia junto con el agua. En el caso particular del repositorio no hay biodegradación apreciable.

Gas del suelo recibe los hidrocarburos del suelo, del agua y de la fase libre los moviliza a la atmósfera. Puede recibir los productos de la biodegradación (CO_2 si es aeróbica o metano si es anaeróbica).

Modelado termodinámico de la variación de la concentración de hidrocarburo en suelo

La concentración de cada componente se puede calcular en función de la fugacidad de acuerdo a la Coulon et al, 2010, Devillers et 2007, McKone (1996) y Mackay (2001) dado que no se consideran ingresos de productos químicos en el suelo los cambios dinámicos en la fugacidad están dados por la Ec (1)

$$f = e^{(-\ DTi\ .t/(Vt.Zbulk))} \quad \text{Ec (1)}$$

D_T (mol Pa^{-1} h^{-1}) es el valor medio de difusión D, Vt: volumen total (m^3) y Zbulk: constante del suelo.
Conocidas las constantes D_T,Vt y Zbulk se puede calcular la variación de f en función del tiempo y a partir de esta la concentración de cada compuesto.
Dada la gran cantidad de compuestos que conforman los hidrocarburos y la dificultad para determinarlos con precisión en particular cuando los mismos son de procedencia diversa; se ha procedido a caracterizarlos por fracciones. Para cada fracción se han determinado las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de interés ambiental. Se puede aplicar el método descripto anteriormente para calcular la variación de f en el tiempo y luego la concentración de cada grupo de compuestos. La concentración total de hidrocarburo está dada por la Ec (2)

$$CT\ (t) = \sum Ci\ (t) \quad Ec\ (2)$$

Donde CT(t) es la concentración Total y Ci (t) la concentración del componente i en el tiempo t. Este método permite determinar la concentración estimada de cada fracción de hidrocarburo en función del tiempo.

Definición de los parámetros de la ecuación

Los parámetros de la ecuación (D_T, Vt y Zbulk) están definidos de acuerdo a Coulon et al, 2010, Devillers et 2007. La velocidad de reacción se calculó en función del tiempo de vida media considerando la reacción de primer orden que es la simplificación de la ecuación de Monod para altas concentraciones de substrato cuando se trabaja en suelos contaminados con residuos orgánicos (La Grega et al, 1996). El resto de las propiedades requeridas se indican en se tomaron de Coulon et al, 2010 y TPHWG, 1999.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este modelo se fijan variables en función de las características del suelo. Dado que no se conocen los datos correspondientes a Argentina, se procedió en primera instancia a utilizar los datos bibliográficos (Ver Fig. 2)
Como en este caso no se logró una correspondencia en el comportamiento se definieron valores de los coeficientes de transferencia que se ajustaran mejor a los datos de campo y se estudió la modificación de la velocidad de reacción basada en los tiempos de vida media de cada compuesto en suelo como una fracción de la indicada en la bibliografía, basándonos en el hecho de que el proceso no se lleva en las condiciones óptimas, sino con un déficit de humedad que impide la adecuada disponibilidad de los nutrientes. En base a estos resultados se procedió a determinar los coeficientes de transferencia por el modo inverso. Para ello se tomó el coeficiente de transferencia de masa como 0,00001 m/h debido a las condiciones experimentales del tratamiento, con una minimización de los factores que aceleran la transferencia de materia. Esta hipótesis se fundamenta en las características del proceso; gran homogeneidad debida a la remoción del suelo por efecto de la maquinaria, lo que hace que las diferencias de concentración sean muy bajas y la migración de contaminantes se haga sólo por lixiviación y difusión gaseosa.

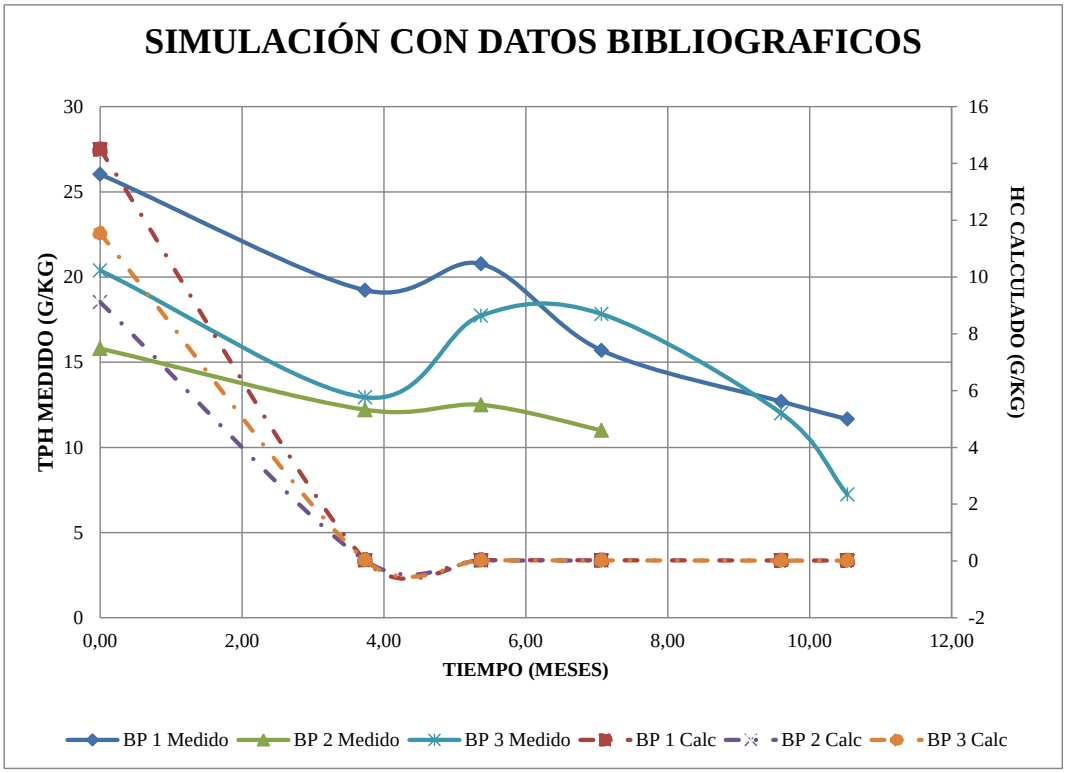


Figura 2. Resultados de la primera simulación

Además las biopilas están construidas de forma tal que sólo la cara superior se encuentra en contacto con la atmósfera (Ercoli et al, 2000), (Ercoli et al, 2001), (Ercoli et al 2003), (Gálvez et al, 2005). Se tomó en primera instancia una vida media del orden del 45 % de la reflejada en la bibliografía de referencia (Coulon et al, 2010), (Devilliers et al, 2007) . Luego en base a los resultados se analizaron las tres biopilas. De estas se adaptaron parcialmente las biopilas 1 y 2, los datos correspondientes a la biopila 3 se alejaron mucho del comportamiento esperado para estos sistemas.

En los gráficos siguientes se ven los resultados de la simulación de la biopila 1, 2 y 3. Los mismos muestran en línea llena los datos experimentales sobre la escala vertical izquierda y en línea punteada los resultados calculados de la fracción degradable indicados en el eje vertical secundario (se ha realizado esta representación gráfica con un cambio de ejes para considerar los hidrocarburos no degradables como una fracción constante).

Para el valor seleccionado del coeficiente de transferencia se han realizado los siguientes valores de K

K = 0,45 indica que las velocidades de reacción son un 45 % del registrado en bibliografía, lo que implica una modificación de la vida media

K = T1/2 indica que las vidas medias son las registradas en bibliografía

K = 0 indica ausencia de reacción química o biológica

K = 0,3 indica que las velocidades de reacción son un 30 % de las registradas.

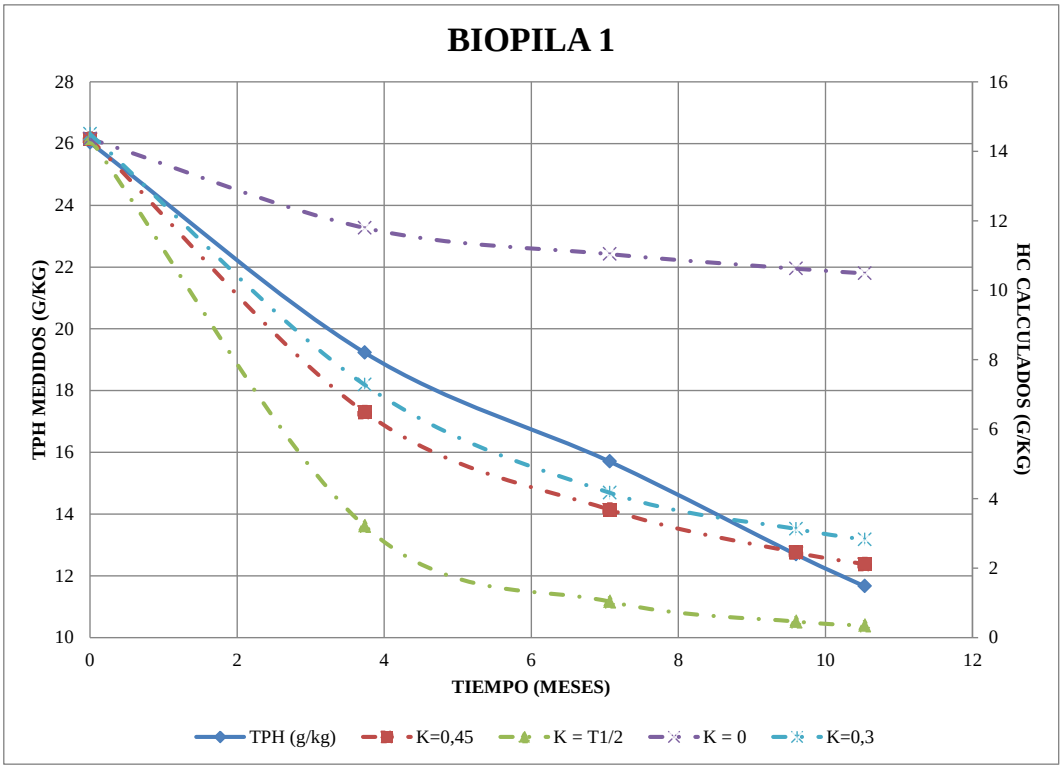


Figura 3. Resultados de la simulación para la biopila 1

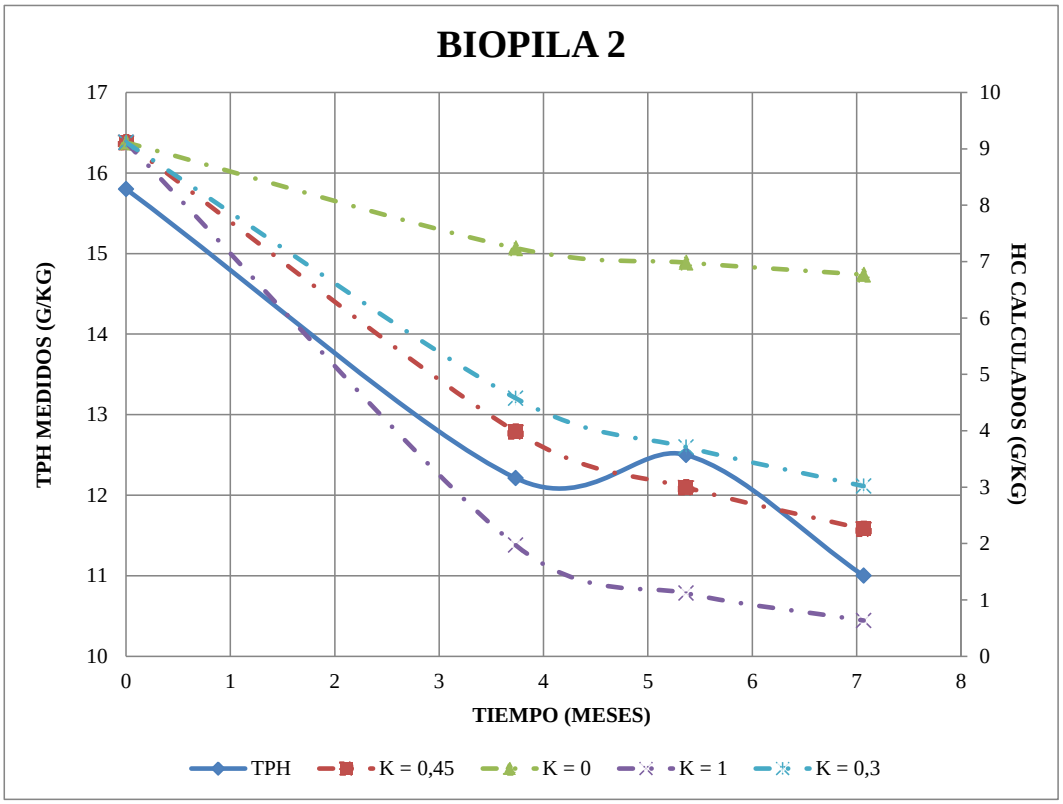


Figura 4. Resultados de la simulación para la biopila 2

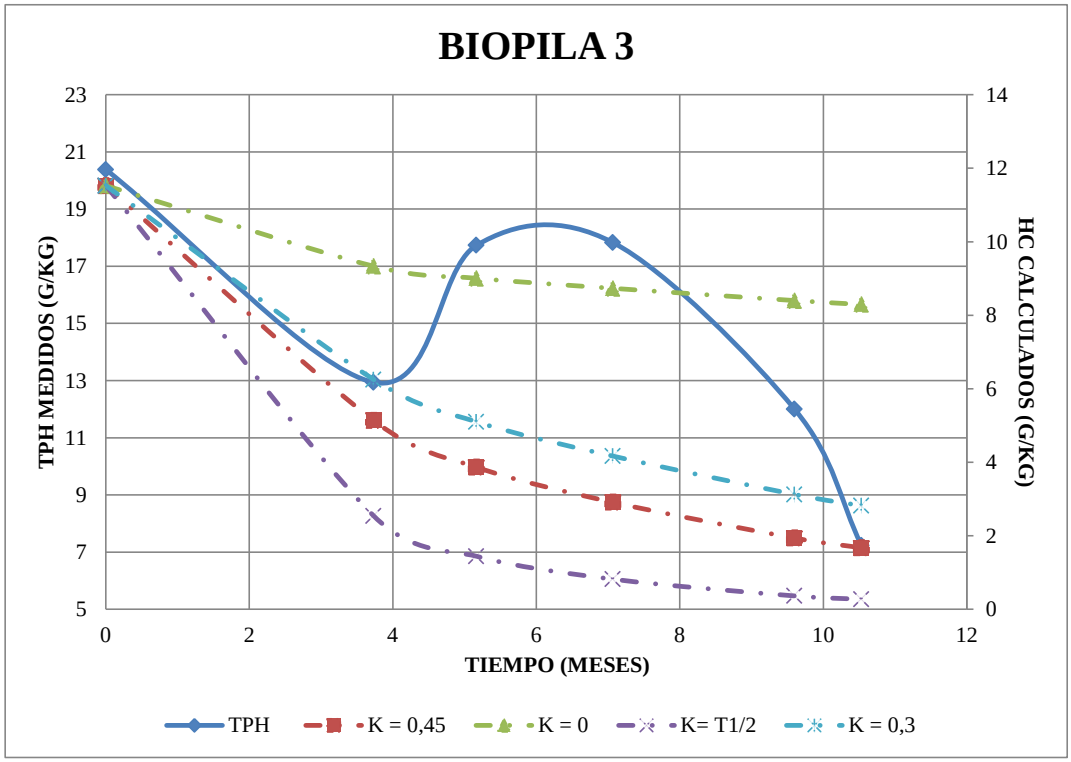


Figura 5. Resultados de la simulación para la biopila 3

Debido a la dispersión de los datos experimentales no se consideró la biopila 3 para este análisis.

En la simulación al considerar los tiempos de vida media de las fracciones de hidrocarburo como se indican en la bibliografía se encuentra que la concentración de hidrocarburos desciende muy rápidamente y no corresponde con la geometría de la curva experimental.

Para el caso de ausencia de reacción química o biológica, las pérdidas por efectos físicos son apreciables a pesar de haber tomado un coeficiente de transferencia muy bajo.

Para valores menores de la velocidad de reacción (45 % y 30 %) se logra una mejor correlación pero la forma de las curvas obtenidas indican que las vidas medias de los compuestos de mayor peso molecular deberían variar en un factor diferente que los de menor peso molecular para adaptarse a los datos experimentales.

En base a esta observación se realizó dos modificaciones a la velocidad de reacción para cada fracción en la simulación con la biopila 1. Los datos se indican en la tabla X y los resultados en la figura 6.

Tabla X. Velocidades de reacción

Fracción	HC R1	HC R2
Alifática (h^{-1})		
C5-C6	0,00142354	0,00064059
C6-C8	0,00126792	0,00095094
C8-C10	0,00308559	0,00347129
C10-C12	0,0128672	0,01654355
C12-C16	0,04104246	0,07387642
C16-C35	0,46379637	0,59630962
Aromática (h^{-1})		
C5-C6	0,00232598	0,00174449
C6-C8	0,0060377	0,00452828
C8-C10	0,01185386	0,01333559
C10-C12	0,0406162	0,05222083
C12-C16	0,26781502	0,3443336
C16-C21	1,60436649	2,88785967
C21-C35	160,757813	206,654019

Los resultados obtenidos indican un mayor ajuste en la primera fase del proceso pero no ocurre así al final. En los dos últimos puntos se observa que la concentración obtenida por cálculo es superior al dato experimental.

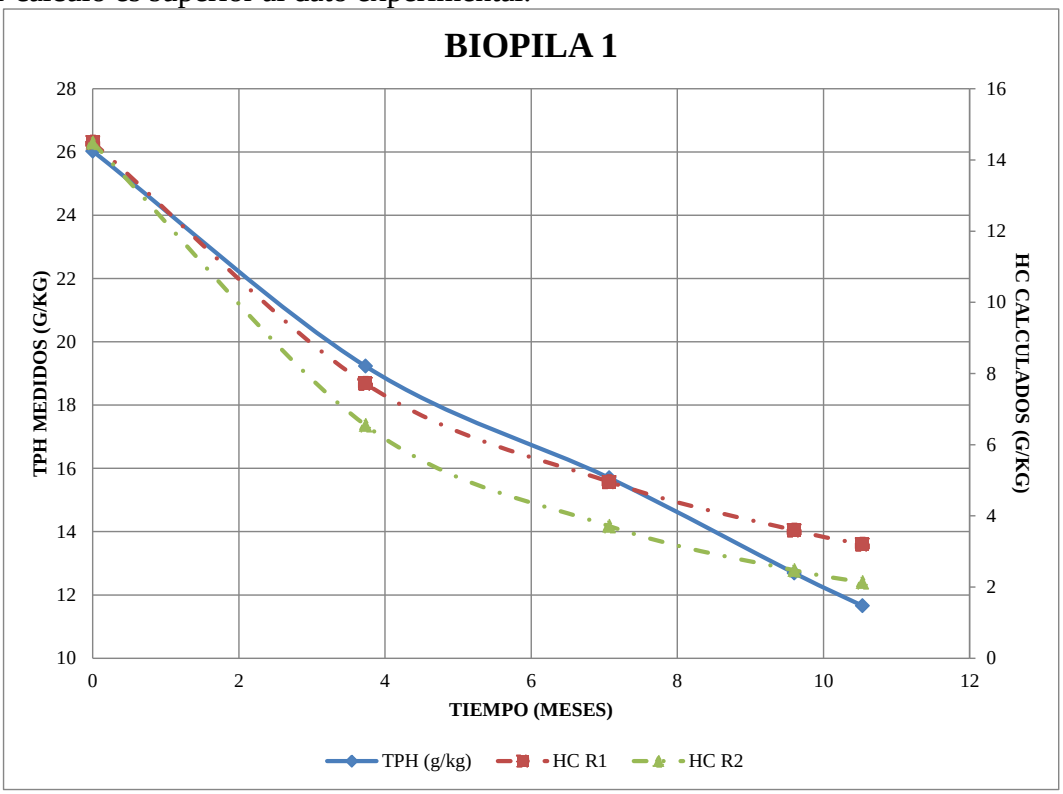


Figura 6. Resultados de la simulación para la biopila 1 con velocidades de reacción modificadas

En este caso los datos experimentales indican una mayor disminución de hidrocarburos debido a un aceleramiento. Esta variación se puede deber a varias causas:

1- Aumento de la velocidad de transferencia de materia por factores no controlados en el proceso (por ejemplo lluvias torrenciales, de las cuales no se disponen de datos)
2- Existencia de una fase libre no acuosa (hidrocarburo libre) no contemplada que afectaría el modelo conceptual
3- Por la acción microbiana algunos hidrocarburos considerados recalcitrantes sufrirían cambios en su estructura molecular y generarían compuestos de menor peso molecular fáciles de degradar y explicaría el aumento de velocidad (Borole and Ramirez-Corredores, 2006)

CONCLUSIONES

1- Se planteó un modelo de migración de contaminantes basado en propiedades físico químicas y termodinámicas que se adapta parcialmente a los datos de campo de dos de las tres biopilas estudiadas. Esta variación se debería a tres causas probables:
   - Aumento de la velocidad de transferencia de materia por factores no controlados en el proceso (por ejemplo lluvias torrenciales, de las cuales no se disponen de datos)
   - Existencia de una fase libre no acuosa (hidrocarburo libre) no contemplada que afectaría el modelo conceptual
   - Por la acción microbiana algunos hidrocarburos considerados recalcitrantes sufrirían cambios en su estructura molecular y generarían compuestos de menor peso molecular fáciles de degradar y explicaría el aumento de velocidad.
2- De acuerdo a la conclusión anterior se requiere una modificación del modelo planteado en donde se incluya la fase libre no acuosa en las celdas consideradas y considerar además de las biopilas analizadas otras en donde se haya registrado con mayor detalle las condiciones climáticas que afecten al proceso (caso de lluvias torrenciales).
3- La última causa de variación de la concentración indicada en la conclusión 2 deberá ser objeto de un estudio más profundo y detallado.
4- A pesar de que el modelo debe ser ajustado, la disminución de hidrocarburos por factores diferentes a las reacciones químicas son apreciables y no deben ser despreciados.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. Designation: E1739 – 95 (Reapproved 2015)

Borole, A.P and Ramírez-Corredores, M.M. BIOCATALISIS IN OIL REFINING (2006).

Cantero, J; Videla, S.; Gálvez, J.; Vardaro, S.; Tettamanti, G. López, A. y Ercoli, E.Límites prácticos de biorremediación de suelos afectados por Petróleo**.** 6tas Jornadas De Preservación De Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas. Neuquén. Instituto Argentino del Petróleo. (2005)

Coulon, F.; Whelan, M.; Paton, G.; Semple, K.; Villa, R; Pollard; S. Multimedia fate of petroleum hydrocarbons in the soil: Oil Matrix Of Constructed Biopiles. Chemosphere 81 1454–1462. (2010)

Devillers, J and S. Bintein W. Karcher CHEMFRANCE: A REGIONAL LEVEL III FUGACITY MODEL APPLIED TO FRANCE. Chemosphere, VoL 30, No. 3, pp. 457.-476, 1995

Singh Environmental Bioremediation Technologies, Shree N. Singh, Rudra D. Tripathi. Springer Verlag (Berlín) 2007

Ercoli, E.; Fuentes B., J; Gilobert, M.; Galvez, J.; Arreghini, M, Tratamiento Biológico de Lodos de Refinería. 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos: 497- 506 (1995a).

Ercoli, E.; Gálvez, J.; Aranzadi, E.; Santos, A.; Cantassano, P. Tratamiento Biológico Ex-Situ DeResiduos Semisólidos De Oleoductos. 1º Encuentro Latinoamericano para la Calidad en la Industria Petrolera: 311-318 (1995b).

Ercoli, E.; Gálvez, J.; Di Paola, M.; Cantero, J.; Videla, S.; Medaura, M.; Bauzá, J. Analisis y Evaluacion De Parametros Criticos En Biodegradacion De Hidrocarburos En Suelo. Congreso Producción 2000. III Workshop Latinoamericano sobre aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería de Petróleo. Puerto Iguazú. Argentina. (2000)

Ercoli* E.; Gálvez*, J.; Calleja•, C.; Calvo•, V.; Cantero*, J.; Videla*, S.; Medaura*, M.C.; DiPaola*, M. Extensive Evaluation of Aerated Accumulation Technique for Soil Treatment, SPE 69445 , 25–28. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Buenos Aires, Argentina (2001).

[Ercoli, E; Calleja, C.; Videla, S.; Segura, O.; Gálvez, J; López, C.; Cantero, J.; Tettamanti, G.; Medaura, C; DiPaola, M.; Vardaro, S.; Caso, R. Technology Evaluation Report For Bioremediation In Repsol YPF, Neuquén, Argentina. 2nd International Conference of Petroleum Biotechnology. Mexico DF. (2003).

La Grega, M.D, Buckingham, P.L, Evans, J.C Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. La Grega, M.D,. Mc Graw Hill (1996)

Mackay, D., Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach, Second ed. Lewis Publishers, MI. 2001.

McKone, T.E.. Alternative modeling approaches for contaminant fate in soils: uncertainty, variability and reliability. Reliab. Eng. Syst. Saf. 54, 165–181. 1996

Singh, S.H. Tripathi, R.D. Environmental Bioremediation Technologies. Springer Verlag (Berlín) (2007).

Pollard, Simon J.T.; Rupert L. Hough, Kye-Hoon Kim, Jessica Bellarby, Graeme Paton, Kirk T. Semple, Frèdèric Coulon. Fugacity modelling to predict the distribution of organic contaminants in the soil: oil matrix of constructed biopiles. Chemosphere 71 (2008) 1432–1439

TPHCWG, Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Croup Series. Vol. 3. (1999)

Gálvez, José; Cantero, José; Videla, Silvina and Ercoli, Eduardo. Clean Up Practical Limits On Full Scale Bioremediation Processes For Hydrocarbon Contaminated Soils. The Twentieth International Conference on Solid Waste Technology and Management, Chester, PA U.S.A. (2005)

Von Fahnestock, F.M.; Wickramanayake, G.B.; Kratzke, R.J.; Major, W.R.; Biopile Desing, Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon-Contaminated Soils., Battelle Press, Ohio, USA, (1998)

ESTUDIO DE PERFILES ALARES PARA MICROAEROGENERADORES HAWT A BAJO NÚMERO DE REYNOLDS

Ganiele M. J. [a,b,c] , Nicoletti P. [b,c] , Villanueva A. F. [b,c]., Montenegro S. O. [a,b,c], Lingeri S. D.[c,d], Anello D. C.[c,e] y Ponzoni L. M.[b,c]

[a] *Universidad Nacional de San Martín, Instituto Sábato, ARGENTINA*
[b] *Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*
[c] *Laboratorio Perfil Alar, Gerencia Materiales, Centro Atómico Constituyentes, ARGENTINA*
[d] *Laboratorio de Análisis de Vibraciones y Extensometría, CAE, ARGENTINA*
[e] *Laboratorio de Daño por Radiación, GAEN, Centro Atómico Constituyentes, ARGENTINA*

e-mail: mjganiele@gmail.com; lponzoni@untref.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo consiste en el estudio aerodinámico de 8 perfiles alares distintos; NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137 a bajo número de Reynolds. De manera de poder seleccionar el perfil ideal para el diseño de los álabes de un aerogenerador de baja potencia de ≈ 1 kW. Mediante el software QBlade se han analizado los valores de los coeficientes adimensionales de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a un Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de 0° a 20°. Mientras que utilizando el software SolidWorks® se ha simulado el comportamiento del flujo de aire alrededor de los perfiles bajo distintas condiciones de cálculo, variando el refinamiento en búsqueda de la convergencia de los resultados. Finalmente, se realizó una comparación de los resultados de simulación numérica obtenidos con Flow Simulation con los del software QBlade®. De esta forma se pretende verificar las simulaciones obtenidas, a fin de seleccionar el perfil adecuado para las condiciones de estudio.

Palabras claves: perfil alar; sustentación; arrastre; simulación

INTRODUCCIÓN

Varios países de Latinoamérica y en particular Argentina, han suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por lo cual, fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental. Las perspectivas de Argentina en materia de energía eólica son francamente alentadoras. Existen numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, así como también en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires (Secretaria de Energia, 2008)

Hoy en día, el desarrollo de energías renovables a pequeña escala hace viable la generación de energía eléctrica en zonas alejadas de las grandes urbes. Las cuales por cuestiones económicas y geográficas no poseen una conexión a la red eléctrica, siendo la principal forma de generación de energía el uso de pequeños generadores eléctricos que usan combustibles fósiles para su funcionamiento.

La eficiencia de un aerogenerador depende de varios factores principalmente del diseño del mismo; el tipo de perfil alar, diámetro, altura, rotor; de acuerdo de las características del viento de la zona a instalar. Sin embargo, gran parte de los desarrollos nacionales de aerogeneradores no tienen en cuenta estos factores, utilizando réplicas de otros modelos comerciales de aerogeneradores que no son las óptimas para los vientos de estas latitudes. Esto se da como consecuencia a la falta de infraestructura muchas PyMES dedicadas al rubro y la complejidad ingenieril que requieren el desarrollo de este tipo de máquinas.

Una forma de mejorar la eficiencia de los aerogeneradores nacionales es crear un laboratorio de ensayos, para que los mismos fabricantes puedan probar y analizar diversos factores de diseño. Por eso, desde el laboratorio de "Perfil Alar", se ha conformado un grupo de investigación, que se encuentra trabajando en un laboratorio de prueba de aerogeneradores de baja potencia, con el objetivo de llegar a ser un referente a nivel nacional para la prueba y desarrollo de aerogeneradores de baja potencia para la Argentina.

En este trabajo, se presenta el diseño de álabes para aerogeneradores de eje horizontal mediante el análisis de diversos perfiles alares, empleando dos softwares y la convergencia de resultados.

Objetivo

Diseño de los álabes de un aerogenerador de baja potencia de ≈ 1 kW, mediante el estudio de distintos perfiles alares a bajos números de Reynolds.

En el presente trabajo, se estudiarán diversos perfiles alares mediante la realización de simulaciones fluidodinámicas utilizando el software SolidWorks®. Los resultados de la simulación se contrastarán con valores obtenidos mediante el software QBlade® con el objetivo de seleccionar el perfil adecuado para las condiciones de estudio.

Introducción al funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal

Un aerogenerador es una máquina hidráulica empleada para transformar, con una determinada eficiencia, la energía cinética del viento en energía eléctrica. La fuerza del viento mueve las aspas del aerogenerador, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica del eje y este movimiento se transmite a un generador que produce la energía eléctrica (Carta González et al , 2012).

Un aerogenerador de eje horizontal es aquel en que el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. El mismo se encuentra conformado por las siguientes partes, tal como se indica en la Figura 1.

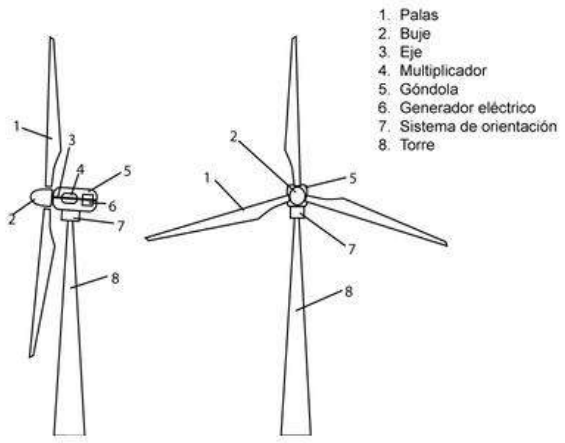


Figura 1 - Partes de un aerogenerador de eje horizontal.

1. Palas/Álabes: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.
2. Buje: está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
3. Eje: conecta el buje del rotor al multiplicador, lo que permite que gire aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), y de funcionamiento al generador eléctrico.
4. Multiplicador: Puede estar presente o no dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico.
5. Góndola: se trata de un cubículo que se podría decir que es la sala de máquinas del aerogenerador. En la góndola se encuentra la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro.
6. Generador eléctrico: aparato que se utiliza para convertir la energía mecánica en eléctrica.
7. Sistema de orientación: permite a la góndola girar en torno a la torre para colocar la turbina mirando en dirección al viento.
8. Torre: ubica al generador a una mayor altura donde los vientos son de mayor intensidad y transmite las cargas del equipo al suelo.

Funcionamiento aerogenerador

El elemento encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación es el rotor, formado por varios álabes que se insertan en una pieza común denominada buje.

Los aerogeneradores extraen la energía del viento transfiriendo la fuerza de empuje del aire que pasa a través de la turbina a las palas del aerogenerador. Las palas actúan de manera similar a las alas de un avión, utilizando el denominado principio de sustentación.

Así pues, cuando tenemos un fluido que pasa a través de un álabe, las partículas de fluido se ven obligadas estrecharse en la parte superior del perfil (extradós), mientras que las partículas que viajan por la parte inferior del perfil (intradós) tienden a ensancharse. Esto conlleva a que en el extradós la velocidad aumente y la presión disminuya. Por el contrario, en el intradós, la velocidad disminuye y la presión aumenta.

Esas dos presiones que aparecen sobre el álabe crean una fuerza en el sentido positivo (opuesto al de la gravedad) ya que la las partículas que pasan por debajo empujan hacia arriba el ala, y las partículas que pasan por encima succionan al álabe también hacia arriba.

Como resultado, la fuerza resultante que actua a una distancia de la raiz de la pala genera un par mecánico que es el responsable de la rotación del eje de la turbina. La potencia al eje se puede aprovechar de diferentes maneras, en el caso de un aerogenerador el eje está conectado con generador eléctrico para la producción de energía eléctrica.

Energía del viento

La energía que lleva el viento es energía cinética, causada por la masa de aire en movimiento. Su expresión es:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \tag{1}$$

donde *m* es la masa de aire y *v* es la velocidad del viento. La potencia extraíble del viento, se puede determinar con la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \tag{2}$$

En donde, ρ es la densidad del aire, *A* es la superficie del volumen de control considerado y *v* es la velocidad del viento. Sin embargo, solo una fracción de la potencia del viento es aprovechable, determinada por la siguiente expresión:

$$P\mathrm{d} = \frac{1}{2} \rho A v^3 Cp \tag{3}$$

El coeficiente Cp se define como el coeficiente de potencia de un aerogenerador, y relaciona la potencia eólica aprovechable y la potencia eólica disponible. Es una medida de la eficiencia de la máquina (Mur Amada, 2001).

El máximo valor teórico que puede alcanzar el Cp fue determinado por Betz, a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento. La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (≈ 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

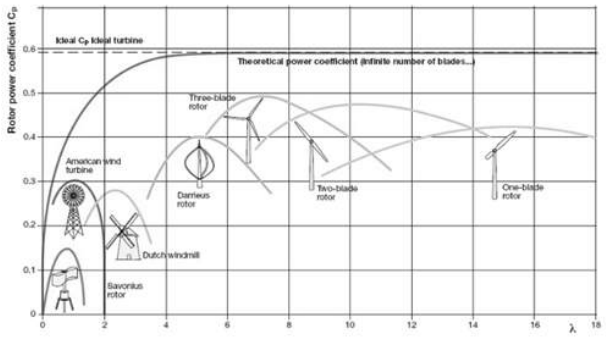


Figura 2 - Coeficiente de Potencia para diversos tipos de turbinas eólicas.

 ISBN 978-987-1323-66-1

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Obtención del Diseño del perfil a ensayar

Como punto de partida para el diseño de un aerogenerador se tienen en cuenta parámetros como el tamaño del aerogenerador (diámetro), la velocidad del viento de diseño y los perfiles aerodinámicos que serán utilizados en el diseño de los álabes. La primera etapa comienza con la recopilación de la información pertinente sobre los perfiles aerodinámicos que se pueden usar en un aerogenerador de baja potencia.

En este trabajo se estudian 8 perfiles aerodinámicos: NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137; los cuales se seleccionaron debido a su buen comportamiento para números de Reynolds por debajo de 500.000 y la utilización con anterioridad en estudios o trabajos relacionados con aerogeneradores de baja potencia.

En la figura 4 se muestran los perfiles seleccionados, los cuales serán el punto de partida para seleccionar el perfil con mejor desempeño aerodinámico que se utilizará para el diseño del álabe.

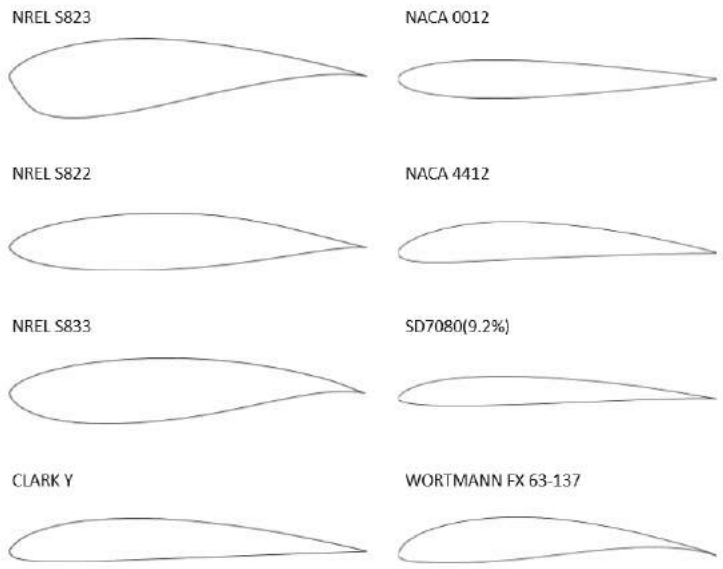


Figura 3 - Perfiles aerodinámicos seleccionados.

Simulación mediante QBlade® y Flow Simulation

QBlade® es un software libre desarrollado por Hermann Föttinger Institute of TU Berlín, que permite realizar los cálculos necesarios para el desarrollo de un aerogenerador. La integración de la funcionalidad XFOIL permite al usuario diseñar rápidamente perfiles aerodinámicos personalizados y calcular sus polares de rendimiento e integrarlos directamente en el diseño y simulación del rotor de un aerogenerador (HFI TU Berlin, 2020).

El software QBlade® fue usado para testear los perfiles seleccionados para un número de Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de 0° a 20° con

incrementos de 2°. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5, 6 y 7. Los perfiles seleccionados son comparados entre ellos en función del coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y del cociente sustentación-arrastre.

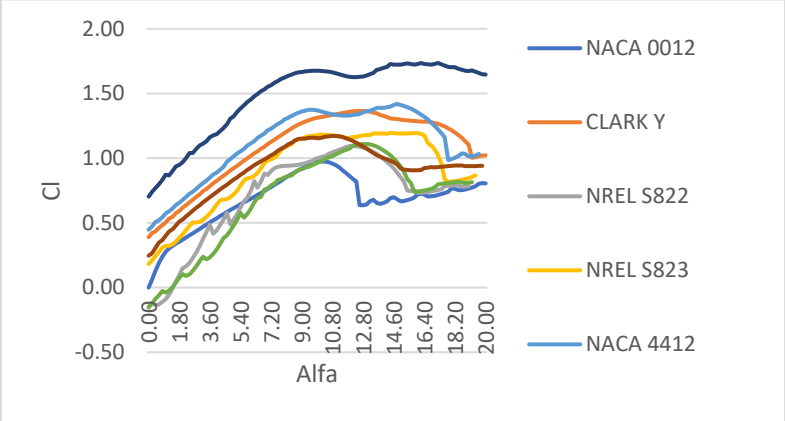


Figura 4 – C_L vs α

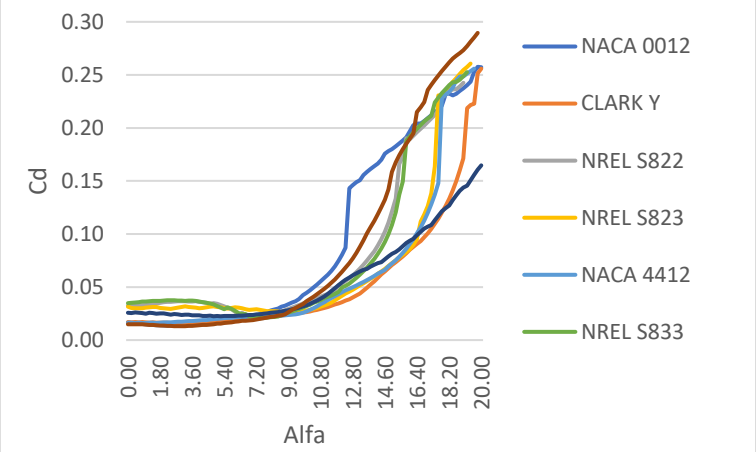


Figura 5 . C_D vs α

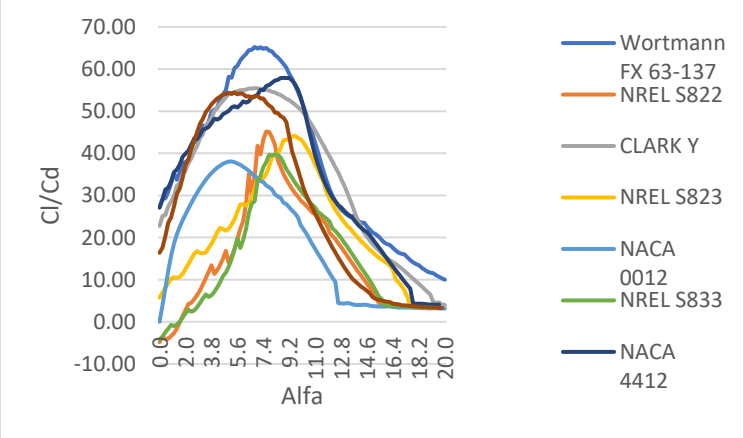


Figura 6 – C_L/C_D vs α

 ISBN 978-987-1323-66-1

La Figura 4, muestra la variación del coeficiente de sustentación (C_L) respecto a los distintos ángulos de ataque para los perfiles seleccionados a Re=109.007. Podemos observar la gran influencia del ángulo de ataque sobre el coeficiente de sustentación e identificar donde aparecen los $C_{Lmáx}$. en cada uno de los perfiles, tal como se indica en la Tabla I- *C_L máx. obtenido para cada uno de los perfiles.*Tabla I.

Tabla I- *C_L máx. obtenido para cada uno de los perfiles.*

	$C_{L\ máx.}$	α
NACA 0012	0.87	8.5 –10.1
NACA 4412	1.40	13
NREL S822	1.09	12
NREL S823	1.2	13 – 16
NREL S833	1.08	12
CLARK Y	1.36	11.8 – 13
SD7080 (9.2%)	1.2	9.8 – 12.2
Wortmann FX 63-137	1.74	13.5

La Figura 6, muestra la variación del cociente sustentación-arrastre (C_L/C_D) para los diferentes perfiles a Re=109.007. Podemos observar que los valores de C_L/C_D varían respecto a los distintos ángulos de ataque (α) e identificar los $(C_L/C_D)_{máx.}$ para cada uno de los perfiles, tal como se indica en la Tabla II.

Tabla II - *$(C_L/C_D)_{máx.}$ obtenido para cada uno de los perfiles.*

	$(C_L/C_D)_{máx.}$	α
NACA 0012	38	4 – 6
NACA 4412	58	8.6 – 9.2
NREL S822	45	8.2 – 8.4
NREL S823	44.2	9.4
NREL S833	39.5	8 – 8.6
CLARK Y	55.5	5 – 8
SD7080 (9.2%)	54	4.5 - 6
Wortmann FX 63-137	65	6.5 - 8

Con el objetivo de contrastar los datos obtenidos mediante QBlade® se realizó la simulación en Flow Simulation de cada uno de los perfiles seleccionados, considerando el ángulo de ataque óptimo para caso. La figura 7, nos permite obtener el ángulo de ataque óptimo para cada perfil, que es aquel que hace máximo el cociente C_L/C_D y con el que se consigue una mejor relación entre sustentación y empuje, es decir una mejor eficiencia aerodinámica (Heras Jiménez, 2012).

Flow Simulation es un complemento del software SolidWorks® que permite simular flujos de fluidos alrededor de un perfil aerodinámico para conocer su comportamiento y capacidades. Es decir, crea un túnel de viento virtual que opera más rápido y a menor costo que un túnel real.

Al momento de realizar las simulaciones se tomó como referencia el trabajo "Investigation of SolidWorks Flow Simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low reynolds number flows" de Joseph Scott Wallace

(WALLACE, 2019) para determinar las condiciones iniciales, opciones de control de cálculo y selección de objetivos.

Cabe aclarar que las metas seleccionadas nos van permitir obtener las fuerzas en las direcciones <*x*> e <*y*>, sin embargo, para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre que estamos interesados en calcular, es necesario realizar una corrección en las fuerzas respecto al ángulo de ataque. Esto se logra con las siguientes ecuaciones.

$$L = F_y \cos\alpha + F_x \operatorname{sen}\alpha \quad (5)$$

$$D = F_x \cos\alpha - F_y \operatorname{sen}\alpha \quad (6)$$

Sin esta corrección, las fuerzas de sustentación y arrastre no serían respectivamente perpendiculares y paralelas a la cuerda del perfil como indican sus definiciones.

$$C_L = \frac{F_y \cos\alpha + F_x \operatorname{sen}\alpha}{\frac{1}{2} . \rho . v^2 . A} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{F_x \cos\alpha - F_y \operatorname{sen}\alpha}{\frac{1}{2} . \rho . v^2 . A} \quad (8)$$

Para cada simulación, los datos obtenidos fueron contrastados con los resultados del QBlade®, analizando cualitativamente las características del flujo, a fin de realizar o no ajustes en las opciones de cálculo de las próximas simulaciones. Completadas las simulaciones, los resultados serán analizados y discutidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros a comparar son los coeficientes de sustentación y arrastre obtenidos mediante QBlade® y Flow Simulation, que serán medidos luego empíricamente en un túnel del viento. En la Tabla III se encuentran los valores hallados en ambos softwares para los perfiles seleccionados.

Tabla III –– *Resultados obtenidos mediante QBlade y SolidWorks.*

Perfiles	QBlade		SOLIDWORKS	
	C_L	C_D	C_L	C_D
NACA 0012	0.804	0.257	0.641	0.049
NACA 4412	1.032	0.256	0.869	0.048
NREL S822	0.942	0.025	0.779	-0.183
NREL S823	1.171	0.027	1.008	-0,181
NREL S833	0.888	0.024	0.725	-0.184
CLARK Y	1.063	0.019	0.941	-0.189
SD7080 (9.2%)	0.738	0.014	0.575	-0.194
Wortmann FX 63-137	1.673	0.035	1,53	-0.173

 ISBN 978-987-1323-66-1

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio es el Clark Y, a pesar de que no presenta un $(C_L/C_D)_{máx.}$, como se puede observar en la Figura 6, presenta el mayor rango de estabilidad del coeficiente C_L/C_D. Por lo tanto, se realizó un análisis específico del mismo para un Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de -2° a 10°.

A continuación, se observan las simulaciones y gráficos más relevantes que nos permitirán analizar y contrastar los valores obtenidos mediante ambos softwares. En las simulaciones del perfil a diferente ángulo de ataque podemos apreciar cómo cambia la separación de la capa límite a medida que aumentamos el ángulo, así como también la estela que se genera. La tabla ubicada a la izquierda de cada simulación nos permite correlacionar la variación de colores con la variación de velocidad alrededor del perfil.

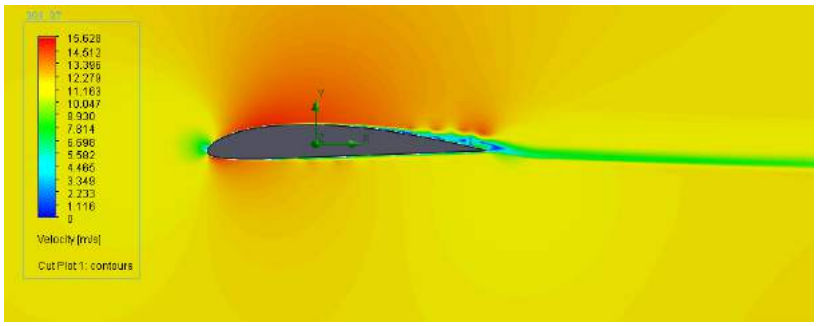


Figura 7 – Simulación Perfil Clark Y: α = 0° y Re= 109.007

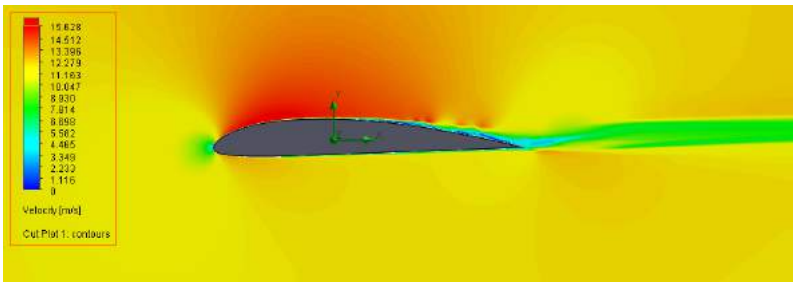


Figura 8- Simulación Perfil Clark Y: α = 2° y Re= 109.007

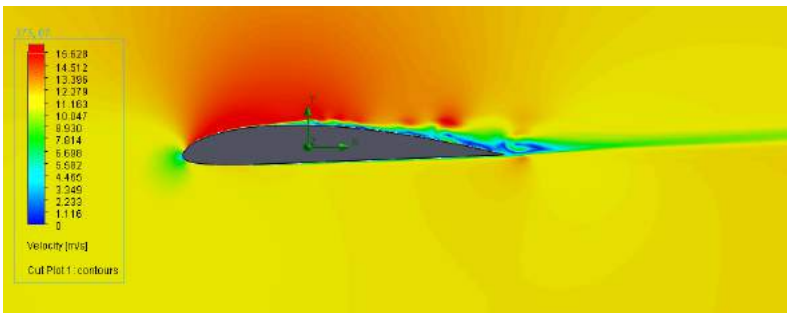


Figura 9 - Simulación Perfil Clark Y: α = 4° y Re= 109.007

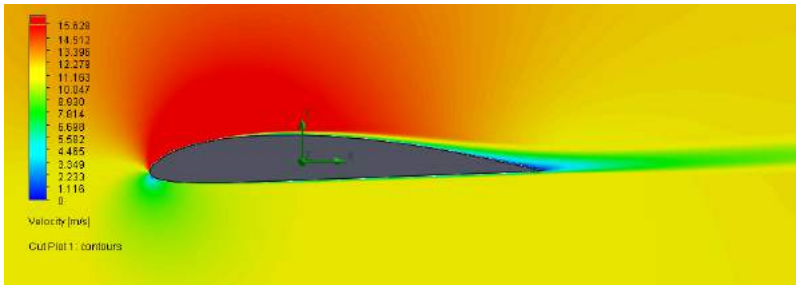


Figura 10 - Simulación Perfil Clark Y: α = 6,5 ° y Re= 109.007

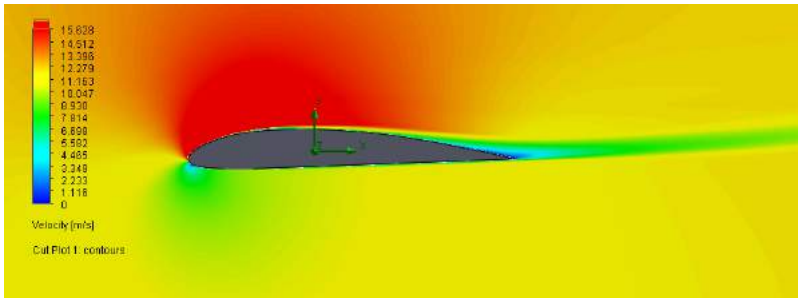


Figura 11 - Simulación Perfil Clark Y: α = 8° y Re= 109.007

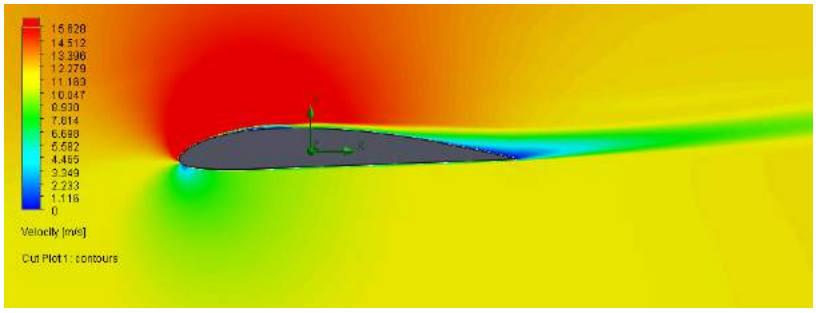


Figura 12 - Simulación Perfil Clark Y: α = 10° y Re= 109.007

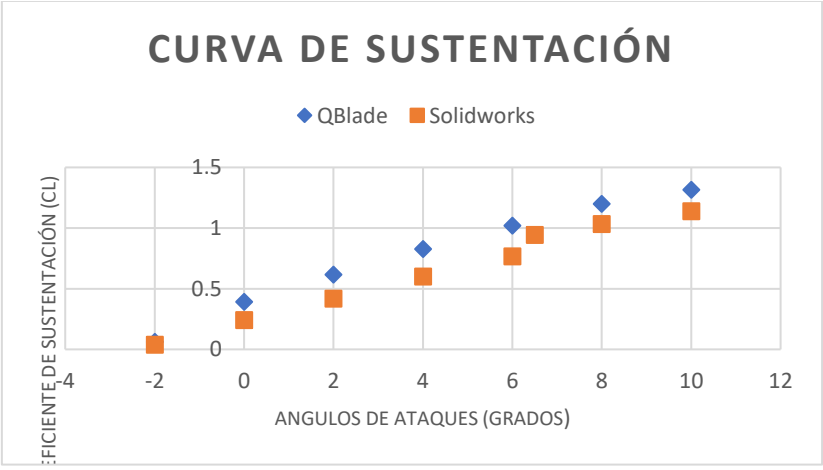


Figura 13 - Curva de sustentación Clark Y, Re: 109.007

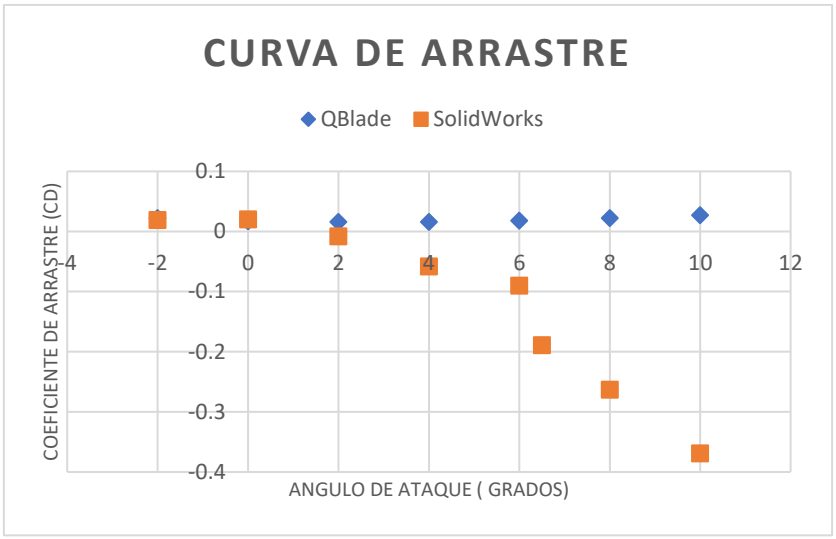


Figura 14 – Curva de arrastre Clark Y, Re: 109.007

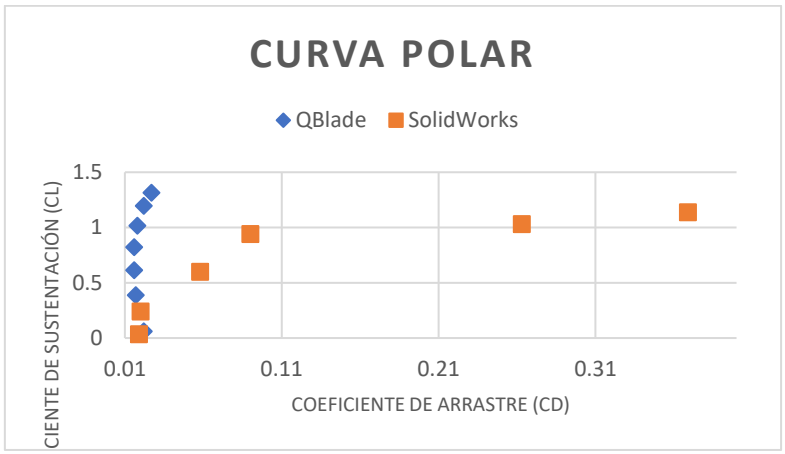


Figura 15 - Curva Polar Clark Y, Re: 109.007

CONCLUSIONES

De acuerdo a los estudios realizados se establecen las siguientes conclusiones:

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio es el Clark Y, a pesar de que no presenta un $(C_L/C_D)_{máx.}$, ya que muestra el mayor rango de estabilidad del coeficiente C_L/C_D, con un valor de 55.5 entre los ángulos α: 5 – 8°.

Se ha podido realizar una comparación entre los resultados obtenidos mediante XFOIL y los resultados alcanzados en este trabajo mediante la simulación.

Esta comparación ha resultado satisfactoria al momento de analizar el coeficiente de sustentación (C_L). Debido a que a pesar que los resultados obtenidos, por ambos métodos, no coinciden con total exactitud de forma cuantitativa presentan una misma tendencia cualitativa. Por tanto, se puede concluir que la simulación realizada es correcta y que los resultados alcanzados simulan los fenómenos de estudio.

Sin embargo, a lo largo de las simulaciones se demostró que los resultados obtenidos para el coeficiente de arrastre (C_D) presentan una menor precisión. Se estima que esto se debe al fenómeno de separación de la capa límite. Tal como se puede observar en las simulaciones, al aumentar el ángulo de ataque aumenta esta separación y se aleja el valor de C_D.

Debido a lo expresado con anterioridad, al observar la curva polar, podemos notar que los primeros puntos de ambos métodos se correlacionan, pero al aumentar el ángulo de ataque comienzan a alejarse. Esto se debe justamente al fenómeno de separación de la capa límite que ya hemos mencionado.

Finalmente, este trabajo pretende servir como base para la prueba de perfiles alares y su contrastación con resultados empíricos realizados en un túnel de viento.

REFERENCIAS

Asociación danesa de la industria eolica. (10 de Mayo de 2003). Obtenido de http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/comp/index.htm

Bastianon, R. A. (2008). *CÁLCULO Y DISEÑO DE LA HÉLICE ÓPTIMA PARA TURBINAS EÓLICAS.*

Bayati, I., Belloli, M., Bernini, L., & Zasso, A. (2007). *Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors.* Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics.

Carta González, J. A., Calero Peréz, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M., & Collado Fernández, E. (2012). *Centrales de Energías Renovables.* España: Pearson.

Fondevilla, M. M., & Scarpellini, S. (2013). *Guía de mercados energéticos.* Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Heras Jiménez, S. (2012). *Mecánica de fluidos en Ingeniería.* Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.Iniciativa Digital Politècnica.

HFI TU Berlin. (15 de Abril de 2020). *Qblade*. Obtenido de http://www.q-blade.org/#welcome

Mur Amada, J. (2001). *Curso de energía eólica.* Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.

National Renewable Energy Laboratory . (2005). *The S822 and S823 Airfoils* . Pennsylvania: NREL.

Rajakumar, S., & Suresh, A. (2019). *Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications.*

Secretaria de Energia. (2008). Obtenido de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf

The UIUC Airfoil Data Site . (2020). *Airfoil Tools*. Obtenido de http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il

Ultimaker. (2020). Obtenido de https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura

WALLACE, J. S. (2019). INVESTIGATION OF SOLIDWORKS FLOW SIMULATION AS A VALID TOOL FOR ANALYZING AIRFOIL PERFORMANCE CHARACTERISTICS IN LOW REYNOLDS NUMBER FLOWS . Stillwater, Oklahoma , Estados Unidos: Oklahoma State University .

EVALUACIÓN DE ASPECTOS HIDRODINÁMICOS, GEOQUÍMICOS Y APTITUDES DE USO DE CAPAS ACUÍFERAS CONFINADAS EN LA PLANICIE LOÉSSICA DE MARCOS JUÁREZ

Giacobone D.[a,b], Blarasin M.[b], Matteoda E.[b], Lutri V.[a,b], *Cabrera A.[c], Currell M.[c], Cendon D.[d] y Cabrera A. E.[a]*

[a]*Área de Geohidrología, Dpto de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA*
[b]*CONICET, ARGENTINA*
[c]*School of Engineering, RMIT University, Melbourne, VIC 3001, AUTRALIA.*
[d]*ANSTO, Lucas Heights, NSW 2234, AUSTRALIA.*

e-mail: dgiacobone@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

Los sistemas acuíferos confinados (SAC) son utilizados para diferentes actividades en la provincia de Córdoba. Dado que la tasa de renovación de estos sistemas puede superar los miles de años, es necesario su estudio y manejo sustentable. El objetivo de este trabajo fue evaluar los aspectos hidrodinámicos, geoquímicos y de aptitudes de uso asociados a los SAC de la planicie loéssica de Marcos Juárez, relacionándolos con el modelo hidrogeológico propuesto para la provincia. Los resultados indican que estas capas, situadas entre los 100 y 150 m de profundidad, se pueden asignar al sistema acuífero confinado SAC B definido para el centro-Este de Córdoba. El flujo regional del agua en estas capas profundas ocurre en la planicie cordobesa en grandes escalas de tiempo, en el orden de 20.000 a 30.000 años AP (edad radiocarbono) observándose descarga parcial en la depresión tectónica de San Antonio. Desde el punto de vista hidráulico, se identificaron dos zonas, la planicie loéssica con perforaciones de tipo semisurgente y la depresión tectónica San Antonio con características de artesianismo, con perforaciones surgentes. El sistema de flujo condiciona el aumento gradual del contenido salino del agua, resultando ésta salobre, con CE desde 3.060 a 5.500 µS/cm, y de tipo clorurada-sulfatada, sulfatada-clorurada, sulfatada y clorurada con catión dominante sodio. Los procesos geoquímicos más importantes interpretados en este sistema acuífero confinado son el intercambio catiónico, que libera Na^+ al agua, la disolución/precipitación de sales de carbonato/sulfatos presentes en los sedimentos y el aumento de cloruros, fundamentalmente aportado por la fase atmosférica, en el sentido de flujo subterráneo. El principal uso de los SAC B en la planicie loéssica de Marcos Juárez es ganadero, y los resultados indican que es apto para bovinos de cría, tambo e inverne, aunque en algunas ocasiones la concentración de sulfato es elevada para dicha actividad.

Palabras Clave: Acuífero confinado, Geoquímica, Ganadería, Córdoba.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso vital y estratégico, pero no siempre puede ser utilizada para consumo humano debido a su mala calidad natural o a contaminación. El tiempo de residencia del agua en un acuífero puede ser de miles de años. Como resultado, el uso de recursos de aguas viejas con poca o nula reposición por recarga

actual puede ser insostenible (Kazemi et al., 2006). Así, es de gran importancia comprender el comportamiento regional de los acuíferos y establecer bases para su manejo en base a herramientas geológicas, geomorfológicas, estratigráficas, geoquímicas e isotópicas (Maldonado et al., 2016, Blarasin et al., 2020). El uso de isótopos estables, acoplado a estudios convencionales hidrodinámicos y geoquímicos del agua, constituye una herramienta confiable para estudiar el origen del agua subterránea y su edad, además de las interacciones y tiempos de residencia del agua (Kazemi et al., 2006, Clark, 2015). Los datos de edades radiocarbono son muy útiles para apoyar este este tipo de estudios y se usan en el caso de aguas viejas (mayor a 1.000 años (Clark, 2015). En cuanto a los isótopos estables de la molécula de agua, son buenos indicadores para complementar la evaluación del paleoclima imperante durante la recarga (frío/cálido, lluvioso/árido) y apoya a los datos de edades en este tipo de estudios (Clark, 2015, Cabrera et al., 2017).

En la provincia de Córdoba, el agua subterránea, tanto del acuífero libre como de capas acuíferas confinadas, es ampliamente utilizada en casi todas las actividades: suministro de agua potable, ganadería, riego, entre otros (Blarasin et al., 2014), siendo el riego de soja y maíz una de las actividades que más agua consumen por el aumento de áreas irrigadas (Barrionuevo y Feler, 2014). En el caso del agua subterránea procedente de los acuíferos confinados, en general ubicados por debajo de los 100 m dependiendo de las características geológicas del sector, el uso está destinado a diferentes actividades, fundamentalmente al riego en el Oeste de la provincia y a las actividades ganaderas hacia el Este (Blarasin et al., 2014). La importancia de estas capas acuíferas confinadas es muy relevante teniendo en cuenta que en algunos lugares, la calidad y/o caudales explotables del acuífero libre son inapropiados para todo tipo de usos, por lo que su estudio integral es sumamente necesario. En este marco el objetivo de este trabajo fue evaluar los aspectos hidrodinámicos y geoquímicos asociados a los sistemas acuíferos confinados (SAC) de la planicie loéssica de Marcos Juárez, relacionándolos con el modelo hidrogeológico propuesto para la provincia, que cuenta con apoyo de datos isotópicos.

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en un sector de la llanura pampeana típica del centro-Este de la provincia de Córdoba (ver Fig. 1), mayormente en el Departamento de Marcos Juárez y en una pequeña porción del departamento Unión (Córdoba), y toma una delgada franja de la provincia de Santa Fe. En el área se practica principalmente el cultivo de soja y maíz con siembre directa, y actividad ganadera subordinada (feed lots y tambos). El área abarca la cuenca baja del Arroyo Tortugas, previo a su desembocadura en el Río Carcarañá, en la que se desarrollan arroyos menores, lagunas, cañadas y gran cantidad de canales artificiales.

El área está caracterizada por morfologías resultantes de sedimentación cenozoica, con predominancia de depósitos relacionados a sistemas fluviales y aluviales efímeros y depósitos eólicos (mayormente loésicos) (Cantú y Degiovanni, 1984, Carignano, 1999, Iriondo 1981, Iriondo y Kröhling, 2007). Desde la perspectiva hidrogeológica es importante considerar el marco regional provincial. Así, en el terreno cordobés, la sucesión de depósitos sedimentarios del periodo Paleógeno Superior-Cuaternario ha condicionado el ensamble hidroestratigráfico de las formaciones acuíferas, acuitardas y acuícludas del subsuelo (Blarasin et al., 2014).

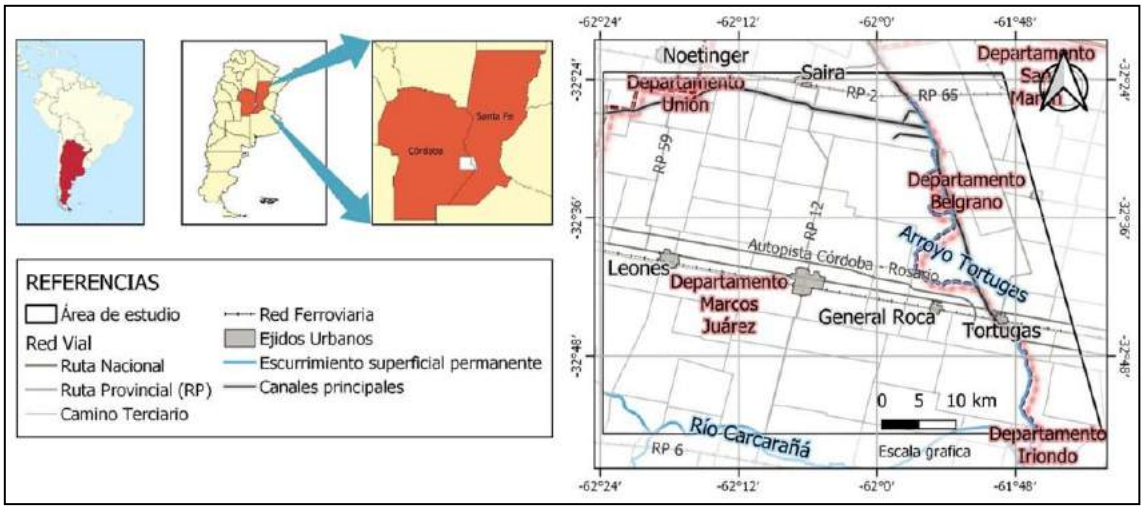


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Dada la variable profundidad de yacencia, espesor, granulometría y cementación de las capas sedimentarias, varían también la Conductividad Hidráulica (K), Transmisividad (T) y Almacenamiento (S) y, por lo tanto, la dinámica y potencialidad acuífera. Los depósitos que contienen los sistemas acuíferos confinados (SAC) son del período Paleógeno Superior-Pleistoceno Inferior, de origen continental y/o marino. Los SAC están conformados por numerosas capas acuíferas intercaladas con capas acuitardas y acuícludas, yacen entre 100 y 450 m de profundidad y poseen diferentes K, T y S por lo que fueron caracterizados como sistemas multicapa, heterogéneos y anisotrópicos. Las mayores reservas corresponden a SAC que contienen capas de sedimentos pertenecientes a paleo sistemas fluviales ubicados en el centro-Oeste de la provincia en los que se explotan caudales de hasta 350 m^3/h) (Blarasin et al., 2014).

En toda la llanura de Córdoba se reconocen dos ambientes depositacionales, continental y marino (ver Fig. 2). Los sedimentos de origen continental conforman el SAC A, y se ubican al Oeste (Fm Tigre Muerto y/o Fm Santiago Temple), generalmente por debajo de los 120-150 m de profundidad. Se trata de capas acuíferas arenosas y areno-gravosas de espesor variable (5-10 m) intercaladas con paquetes de limos y arcillas ocres de gran espesor, cuyo grado de confinamiento aumenta hacia el Este. Especialmente en el centro-Norte y Este de la provincia se identifica el SAC B, que se detecta entre los 80 m de profundidad hasta los 150 m aproximadamente. Según Aguirre (2019) está conformado por las "arenas Puelches", arenas medias a

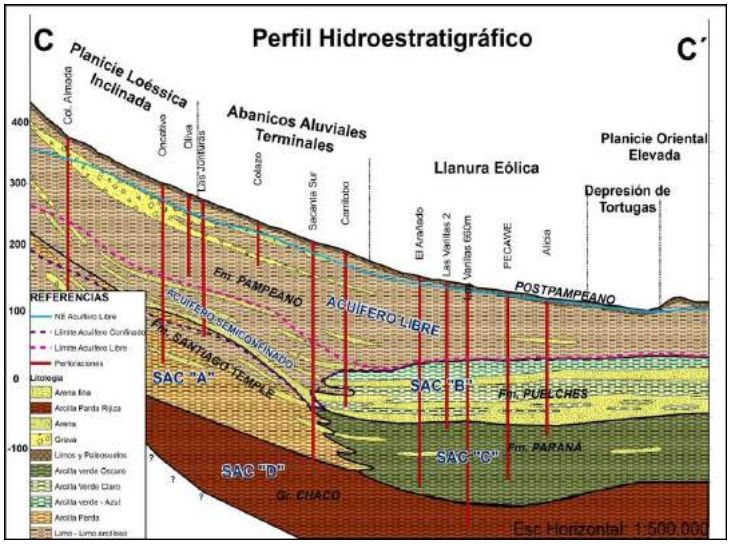


Figura 2. Perfil Hidroestratigráfico entre Col. Almada-Alicia en la provincia de Córdoba (Argentina). Tomado de Aguirre, 2019.

finas de origen fluvial, cuarzosas, redondeadas y bien seleccionadas, con un techo de arcillas de variados colores. Hacia el centro-Este de la provincia, por debajo de aproximadamente los 150 m, se ubican los sedimentos correspondientes a antiguas ingresiones marinas (Fm Paraná), cuyas capas acuíferas poseen pequeños espesores (5 m aproximadamente), conformando el llamado SAC C. En algunas áreas se explotan capas acuíferas en sedimentos continentales (Fm Chaco) correspondientes al SAC D, cuya profundidad es de más de 300 m (Blarasin et al., 2014). En el centro-Este de la provincia una parte importante de las perforaciones que captan de estas capas confinadas son surgentes, es decir, el nivel piezométrico supera naturalmente la superficie del terreno, no siendo necesario el bombeo del agua. La calidad del agua de los acuíferos de la provincia es variable, en general más dulce al Oeste y se saliniza a lo largo del flujo hacia el Este, destacándose que en algunas zonas específicas las aguas son termales (Blarasin et al., 2014).

Isótopos estables del agua y edades radiocarbono de los sistemas acuíferos confinados

Según Blarasin et al. (2020) los datos de isótopos estables del agua muestran que los acuíferos confinados de la zona de Marcos Juárez se ubican agrupados en un conjunto de valores empobrecidos isotópicamente con respecto a los datos de precipitaciones del este de Córdoba (promedio aritmético de precipitaciones en la recta meteórica de Canals: δ^2H = -18,4 ‰ y $\delta^{18}O$ = 4,3 ‰) ya que los valores de δ^2H van desde -38,2 a -35,6 ‰, y los de $\delta^{18}O$, desde -6,31 a -5,91 ‰ VSMOW (Fig. 3.a). Estos valores son similares a los hallados en el área serrana y piedemonte cordobés, interpretándose que ambas zonas son el área de recarga de estos acuíferos profundos. Además, los valores permiten también asumirlas como aguas recargadas en épocas más frías, por lo que la temperatura habría incidido en estos valores de fraccionamiento isotópico, aspectos que se condicen con trabajos realizados por Cabrera et al. (2017), Maldonado et al. (2016) y Blarasin et al. (2020) en otras zonas de la provincia. A su vez, Blarasin et al. (2020b) indican que los valores de radiocarbono ^{14}CDIC-porcentaje de carbono moderno (pMC) son muy bajos (ver Fig. 3.b), lo que indica un tiempo de residencia largo del agua en el medio sedimentario. Las edades calculadas son de 22.980 a 29.960 años AP, correspondiente al Pleistoceno, contrastando con el agua subterránea del acuífero libre que posee aguas en general modernas.

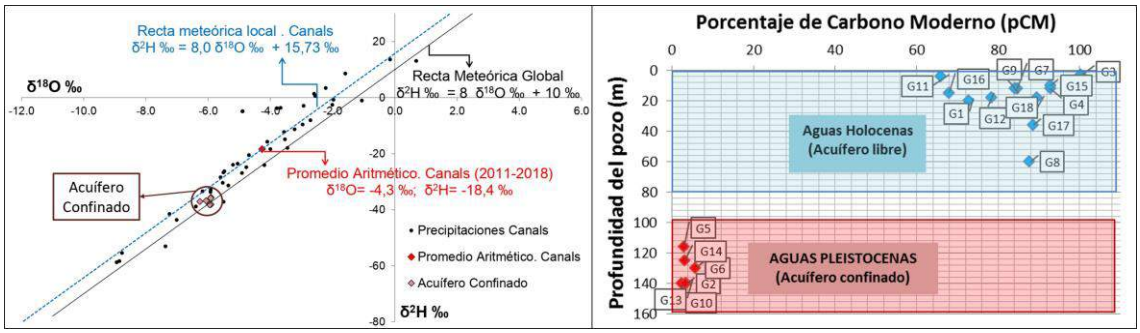


Figura 3.a. Gráfico de δ^2H y $\delta^{18}O$, parcialmente modificado de Blarasin et al., 2020b y **b.** Edad radiocarbono convencional versus profundidad de pozo (Blarasin et al., 2020b).

En el modelo de flujo del agua subterránea propuesto por Blarasin et al. (2014) y Blarasin et al. (2020b), (ver fig. 4) la recarga principal regional se da en las áreas de

montañas y piedemonte. El agua subterránea fluye a diferentes profundidades hacia el Este a medida que envejece, siendo el agua subterránea de los acuíferos más profundos (los sistemas acuíferos confinados) la más vieja e isotópicamente empobrecida, por haberse recargado con aguas con esa firma isotópica. Debe destacarse que en Córdoba al fraccionarse los isótopos de las precipitaciones en su viaje desde el océano Atlántico hacia el Oeste (Fig. 4), se empobrecen en esa dirección por el efecto de "continentalidad". También hay fraccionamiento de los isótopos por efecto de "altitud" en la zona serrana, al ascender las masas de aire, sumándose el hecho de que, en épocas más frías que la actual, puede haber influenciado la temperatura en los procesos de fraccionamiento isotópico.

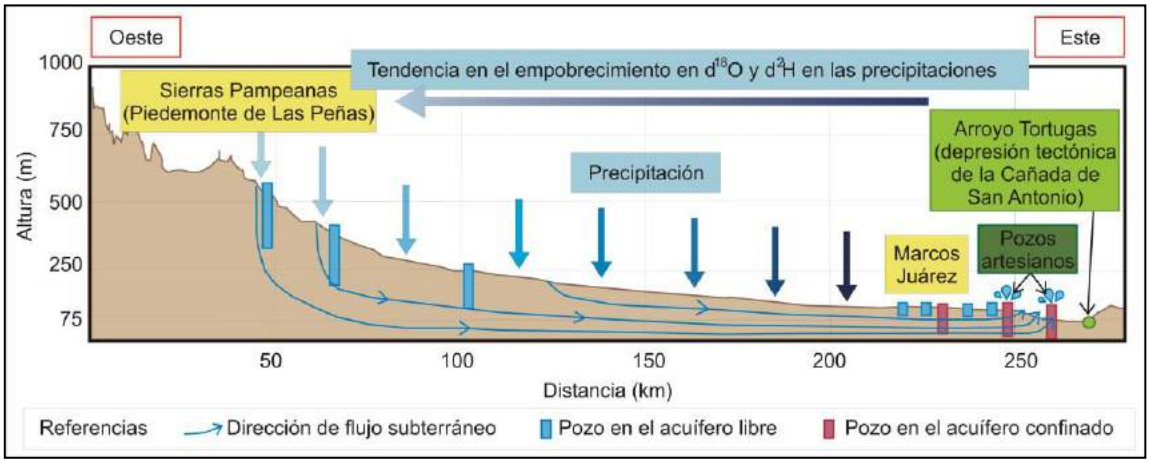


Figura 4. Modelo de flujo del agua subterránea (Blarasin et al., 2020b).

MÉTODOS

El área de estudio abarca 3.500 km^2, y en ella se realizó el análisis y recopilación de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) e imágenes satelitales (Google Earth, Merit DEM, LANDSAT 8, entre otros). La cartografía se realizó con el software QGIS 3.6.1 (2019). Se recopilaron datos del diseño y litología de los pozos (Secretaría de Recursos Hídricos, Polare (2019) y particulares). El censo se realizó en perforaciones (mayo y septiembre de 2019) que captan de diferentes capas acuíferas del sistema acuifero confinado (15 perforaciones) que en todos los casos tenían profundidades declaradas por propietarios o perforistas entre 105 y 140 m. En las 15 perforaciones se midió el nivel piezométrico y en 14 de ellas pudo realizarse el muestreo de agua. Las tareas de muestreo siguieron procedimientos estándar que incluyen la medición de parámetros in situ como pH, CE (conductividad eléctrica), OD (oxígeno disuelto) y T (temperatura), asegurando la renovación de eventual agua estancada en la captación y el registro de los mencionados parámetros. Las muestras correctamente envasadas y refrigeradas fueron enviadas al laboratorio de Geoquimica del Dpto. de Geologia de la UNRC. El análisis físico-químico de elementos mayoritarios disueltos en el agua se realizó mediante metodología Standard (APHA, WEF. AWWA, 2005). Se utilizó el software Diagrammes v5.1 (Simler, 2014) para realizar gráficos de clasificación química de muestras. Las aptitudes del agua para distintos usos (ganadero, consumo humano y riego) se clasificaron en base a Bavera (2001), CAA (1991) y Riverside (1954).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geomorfología

En el mapa Geomorfológico presentado (ver Fig. 5) se muestran los tres grandes ambientes que se diferenciaron en la zona de estudio:

I. Bloque elevado de San Guillermo: Esta morfoestructura está limitada por el sistema de fallas de Tostado-Selva, la falla Rafaela y el Trébol (Kröhling e Iriondo, 2003; Brunetto et al., 2019). Es una loma elevada atravesada por paleocañadas de dirección SO-NE. En este ambiente los sedimentos son principalmente eólicos finos del Pleistoceno tardío y Holoceno y pudieron diferenciarse subambientes como la Escarpa de flexura de la falla de Tostado-Selva (pendiente abrupta hacia el SO de 0,7 a 0,4%) y la Planicie elevada con cañadas (pendiente de 0,1% hacia el NE).

II. Planicie Fluvio-eólica: esta llanura está formada por grandes abanicos aluviales coalescentes generados por ríos que nacen en las Sierras Grandes (Degiovanni et al. 2005, Carignano et al. 2014). Dentro de ella, se observan dos diferentes dominios depositacionales: fluvial, y eólico. El primero abarca zonas pequeñas en la zona de estudio: el sector distal del Paleoabanico Aluvial del río Ctalamotchita y parte de la Faja Fluvial actual de dicho curso y de las Fajas Fluviales del río Carcarañá y del Arroyo de las Tortugas. El dominio eólico está conformado por la Planicie loésica de Marcos Juárez, una planicie prácticamente horizontal, con escaso drenaje, y surcada por paleocañadas de dirección SO-NE. Este dominio comprende la planicie eólica típica de Marcos Juárez, la Escarpa de Juan José del Salteño (con pendiente de 0,6-0,7 % hacia el Este, conformando el límite Oeste de la Cañada de San Antonio) y una zona transicional correspondiente a una antigua faja fluvial con cubierta eólica.

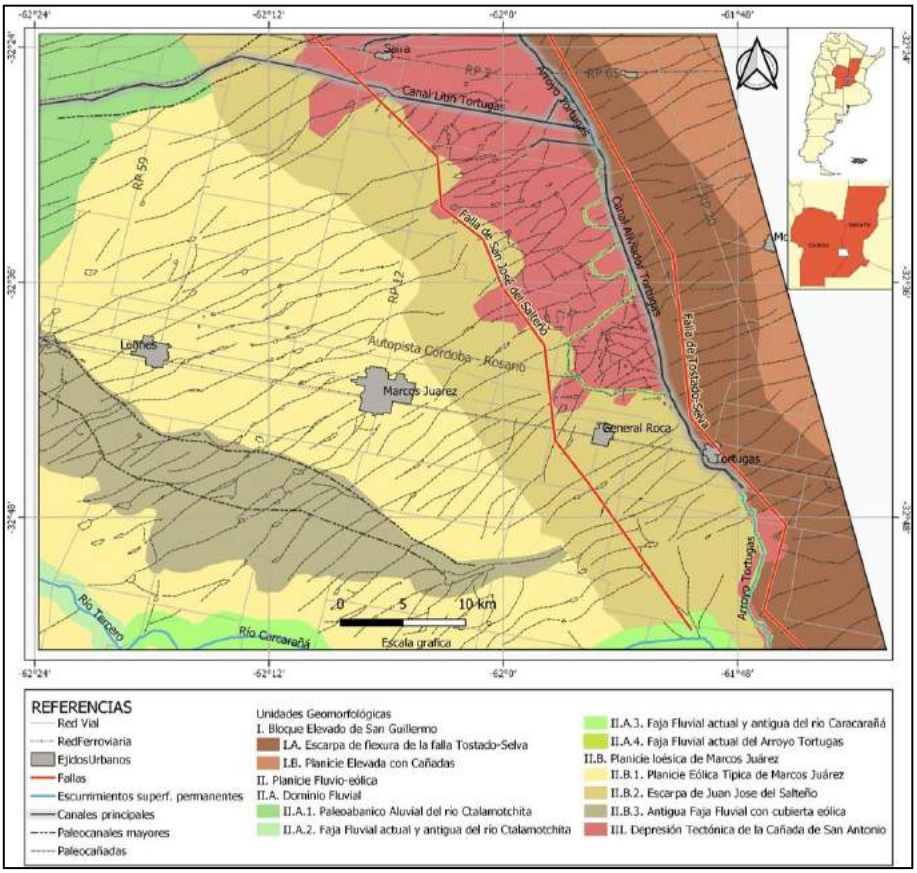


Figura 5. Mapa geológico-geomorfológico.

III. Depresión tectónica de la Cañada de San Antonio: es una depresión estructural que conforma un importante bajo topográfico con diferencia de altura con el bloque y planicie del orden de 20-30 m. Posee en épocas húmedas alto grado de anegamiento debido a su baja pendiente (0,3%) que inclina hacia el SE. Se sitúa en el límite interprovincial Córdoba-Santa Fe. En ella circula el Arroyo Tortugas (actualmente canalizado) y concentra la mayoría de los escurrimientos superficiales que llegan desde las planicies orientales cordobesas, con dirección principal O-E.

Hidrogeología

La columna litológica general de la zona de estudio (ver Fig. 6) está conformada por 10 m de limos eólicos arenosos con intercalaciones fluviales, le siguen 70 m de espesor de arenas eólicas muy finas limosas. Estos sedimentos saturados en agua constituyen el acuífero libre o freático. A mayor profundidad, desde 80 a 100 m de se encuentran sedimentos limosos con distinto grado de cementación. Por debajo, los depósitos están conformados por aproximadamente 50 m de intercalaciones de arenas cuarzosas y arenas muy finas limosas-arcillosas de diferente origen (marino/continental) y colores claros, que constituyen el acuífero confinado Debido a las características halladas y comparaciones con antecedentes (Aguirre, 2019) se asume que corresponden al sistema SAC B. A partir de los 150 m de profundidad se encuentran arcillas verdes de la Fm. Paraná, depositadas durante los procesos vinculados a la ingresión marina Miocena. Las perforaciones que explotan el acuífero confinado para extracción de agua aprovechan las capas arenosas de textura más gruesa, y se ubican desde los 105 m a 150 m de profundidad.

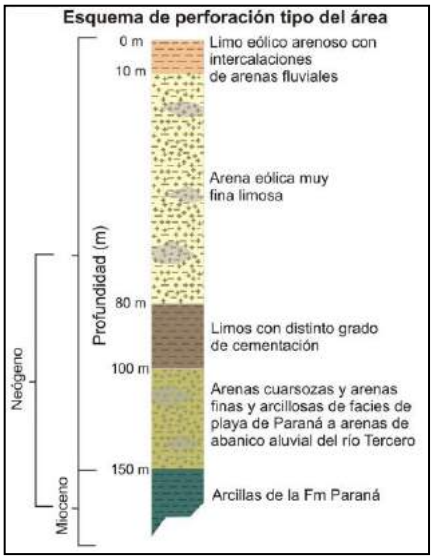


Figura 6. Esquema de perforación tipo del área. Realizado en base a Polare (2019).

Mapa de equipotenciales del sistema acuífero confinado

La conformación geológica-geomorfológica controla la dinámica del flujo de agua superficial y subterránea (Giacobone et al., 2020) En el caso específico del agua subterránea circulante en las capas acuíferas del sistema confinado ubicado entre 100-150 m de profundidad, el flujo se desplaza por la Planicie fluvio-eólica en sentido NNO-SSE (Ver Fig. 7), hacia la Depresión Tectónica de San Antonio con un gradiente muy bajo, desde 0,026 a 0,075%, lo que a su vez implica una baja velocidad de flujo (en promedio 0,05 m/d) Las perforaciones situadas en la planicie que captan aguas del sistema acuífero confinado son semisurgentes debido a que el nivel piezómetro está por debajo de la superficie del terreno. No sucede lo mismo en la Depresión Tectónica de San Antonio, que constituye un área de surgencia donde el nivel piezométrico del sistema confinado supera la superficie del terreno. El nivel piezométrico de muchas de las perforaciones censadas en la depresión tectónica está entre los 4 y 5 m de surgencia (perforaciones G30, G33, G35, G36 y G 37).

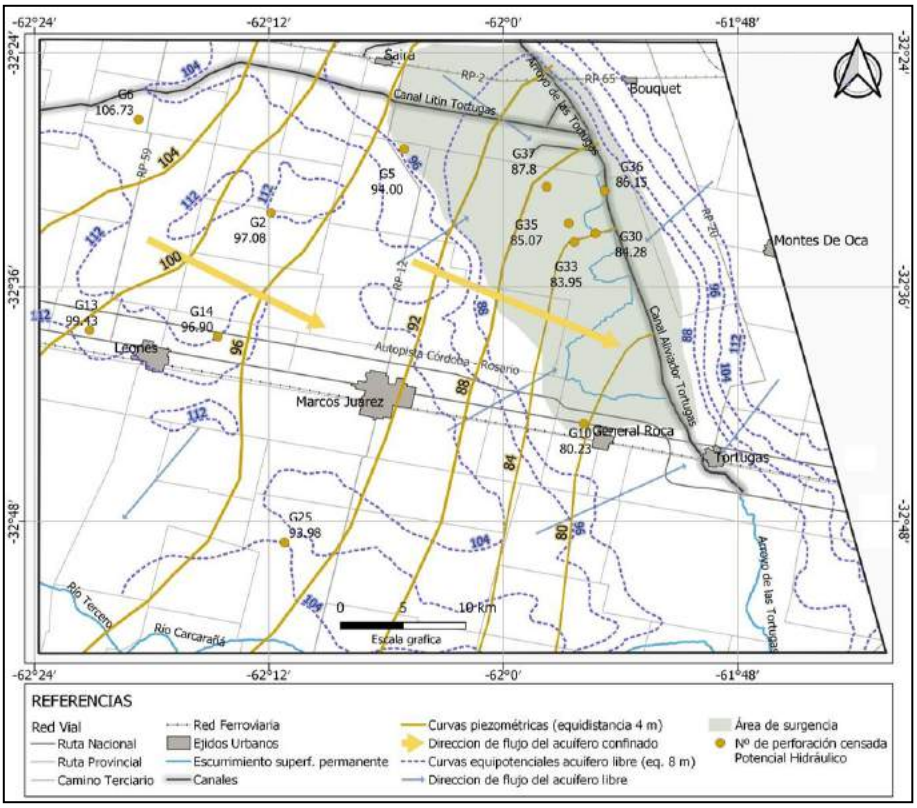


Figura 7. Mapa de equipotenciales del acuífero confinado.

Aspectos geoquímicos del sistema acuífero confinado

El acuífero confinado contiene aguas salobres (2.144 a 3.870 mg/L) con valores de CE desde 3.060 a 5.500 µS/cm. Los altos valores de salinidad se deben a que las capas de las cuales se capta el agua son de grano medio (arenas), implicando lenta circulación del agua y por ende, gran tiempo de interacción agua-sedimento, lo que implica la posibilidad de aporte de solutos a la solución. Además son aguas que circulan largos trayectos desde el Este provincial por lo que su contenido salino puede ir aumentando a lo largo del flujo. En todas las muestras el catión dominante es el sodio (ver Fig. 8); mientras que en base a los aniones dominantes son, en su mayoría, cloruradas-sulfatadas (57,14%), sulfatadas-cloruradas (14,29%), sulfatadas (14,29%) y cloruradas (14,29%). Los valores de salinidad y tipo geoquímico hallados son acordes a lo descripto a nivel regional por Blarasin et al (2014). Si se observan en detalle los datos obtenidos, las características halladas y los antecedentes consultados permiten interpretar los procesos geoquímicos en el acuífero, es decir, a medida que el agua circula explican la predominancia de estos iones ya que el largo tiempo de tránsito del agua subterránea desde la región occidental ha

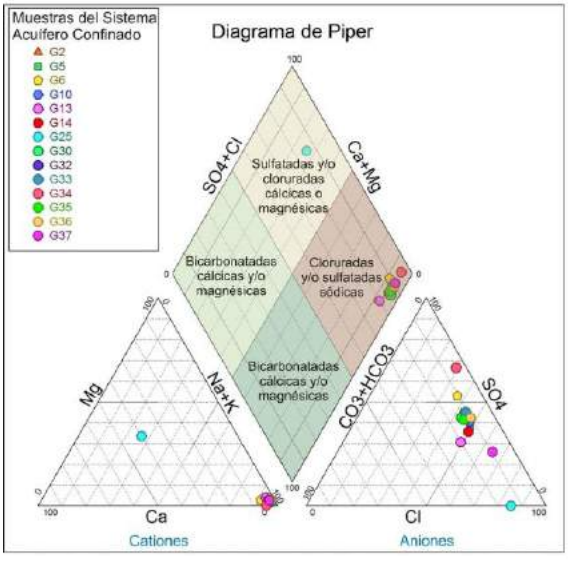


Figura 8. Diagrama de Piper.

permitido procesos de intercambio catiónico (illita domina en la región, Maldonado et al., 2016), que liberaron Na^+ al agua, precipitación de calcita y aumento de sulfatos y cloruros, ya que la mayoría de las sales de estos aniones tienen un alto *K* (producto de solubilidad) que permite su permanencia en solución.
En el caso del Cl^- y SO_4^{-2} en estos ambientes silicoclásticos, en general se incorporan a los acuíferos desde la fase atmosférica y se va concentrando en el flujo; mientras que los carbonatos proceden de la disolución de sales de carbonatos presentes en los sedimentos. También han sido detectadas capas de yeso en profundidad (Aguirre, 2019, Blarasin et al., 2014). Los procesos de hidrólisis de silicatos como feldespato potásico y de vidrio volcánico aportan también sílice y cationes al agua (Na^+, K^+, Ca^{+2}, entre otros, Giuliano Albo, 2013, Blarasin et al., 2014).
En el mapa de la Fig. 9 Se muestra la distribución en el espacio de la CE y tipos geoquímicos. En líneas generales, las aguas con mayor CE se encuentran en el Sur y Este del área de estudio, siguiendo el sentido de flujo. En cuanto al tipo geoquímico las aguas de carácter mixto cloruradas-sulfatadas sódicas se ubican en la zona de la Planicie loéssica de Marcos Juárez y en la Depresión de San Antonio, al igual que unas pocas muestras sulfatadas sódicas y sulfatadas-cloruradas sódicas, mientras que las cloruradas sódicas (más evolucionadas) sólo se encuentran en la Depresión de San Antonio.

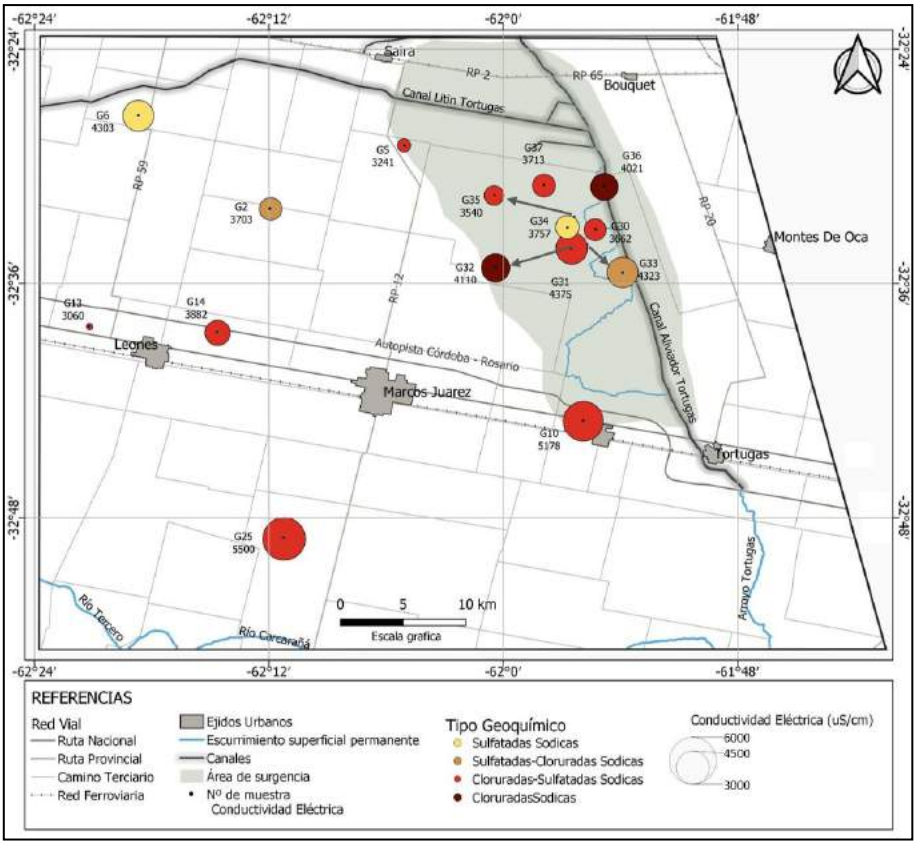


Figura 9. Mapa de tipo geoquímico y conductividad eléctrica de las muestras.

En relación a la aptitud de uso ganadero (Bavera, 2001) la mayoría de las muestras (85,7%) son buenas para bovinos de cría y aceptables para tambo e inverne debido a su contenido salino. Dado que el uso de estas perforaciones es para dicho fin, un aspecto que suele preocupar a los productores es el contenido de sulfatos del agua por la afectación a la fisiología del ganado vacuno. De las muestras analizadas una de ellas

resultó, si bien aceptable para cría, mala usable para tambo e inverne por su alto contenido de sulfatos. Estas aguas no se utilizan para consumo humano ni riego, ya que ninguna cumple con los límites permitidos según el Código Alimentario Argentino (CAA, 1991) debido a que el 85,7% de las muestras tiene alto contenido en sales disueltas totales, sulfatos y cloruros, 7,14% es alta en sales totales disueltas y sulfatos y otro 7,14% es alta en sales totales disueltas y cloruros; según la clasificación de Riverside (1954) un 71,4% es inapropiada para riego por su alta peligrosidad salina y excesiva peligrosidad sódica, 14,3% es de regular a mala para riego por su alta peligrosidad salina y muy alta peligrosidad sódica y 14,3% es inapropiada para riego por su muy alta peligrosidad salina y excesiva peligrosidad sódica.

CONCLUSIONES

Las características hidrodinámicas, geoquímicas e isotópicas del agua han permitido evaluar los sistemas acuíferos confinados que están siendo explotados para consumo fundamentalmente ganadero en el área de la planicie de Marcos Juárez, e insertarlos dentro del modelo propuesto a escala regional. Así, y con el apoyo de datos isotópicos de trabajos previos que indican que en estas capas confinadas circulan aguas viejas de edad Pleistocena recargadas en la zona serrana y pedemontana occidental, se interpreta que los procesos geoquímicos que suceden en este sistema acuífero confinado ocurren en escalas espaciales y temporales muy grandes, con tiempos de residencia del orden 20 a 30 mil años AP.

Las capas acuíferas analizadas se localizan entre los 100 y 150 m de profundidad, de forma que de acuerdo al marco hidrogeológico regional se asignan al sistema SAC B definido para el centro-Este de la provincia de Córdoba. Se detectaron 2 zonas muy típicas desde el punto de vista hidráulico, que inciden luego en las facilidades de uso del agua: la planicie loesica en la que las perforaciones son del tipo semisurgente y la depresión tectónica que muestra características artesianas, siendo las perforaciones de tipo surgente. El agua de este sistema de capas confinadas resultó salobre, estando las de mayor contenido salino hacia el Sur y Este del área de estudio, en coincidencia con el sentido de flujo del agua, en gran medida interpretado como resultado del flujo regional que permitió el aumento gradual del contenido en sales en el agua, que descarga parcialmente en la depresión tectónica. A medida que estas aguas circulan desde las áreas de recarga pedemontanas hacia el Este de la provincia, los procesos geoquímicos principales interpretados son los de disolución/precipitación de sales, intercambio catiónico e hidrólisis de silicatos, los que deberán ser probados con modelos numéricos en próximas etapas.

En relación a su uso, que es principalmente ganadero, el SAC B en el área estudiada es apto para bovinos de cría, tambo e inverne, aunque en algunos sectores tienen elevadas concentraciones de sulfato para esta actividad.

Dado que son sistemas acuíferos en los que la tasa de renovación es muy baja (miles de años), y considerando las edades Pleistocenas del sistema del agua se debe tener en cuenta evitar su sobreexplotación y procurar que el aprovechamiento sea sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Centre for Accelerator Science en ANSTO a través de *Australian National Collaborative Research Infrastructure Strategy (NCRIS). y Foncyt Argentina.*

REFERENCIAS

Aguirre, M. *Caracterización hidrogeológica, hidroquímica e isotópica ambiental de los sistemas acuíferos del noreste de Córdoba.* Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), Río Cuarto (2019).

APHA, WEF. AWWA, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA WEF AWWA (2005).

Barrionuevo, N., y Feler, M. Evolución del área regada con pivote central en la provincia de Córdoba en el periodo 1994-2014. *III Congreso internacional de ordenamiento territorial y tecnologías de la información geográfica.* Universidad Nacional de General Sarmiento. http://ciottig.estudiomanta.com/. (2014).

Bavera, Manual de Aguas y Aguadas para el ganado. Edit. Hemisf. Sur S.A. ISBN 87-43-2856-8 (2001).

Blarasin, M., Cabrera, A., and Matteoda, E. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. UniRío. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina (2014).

Blarasin, M., Cabrera, A., Matiatos, I., Lutri, V., Maldonado, L., Giacobone, D., Matteoda, E., Bécher Quinodoz, F., Giuliano Albo, J., Eric, C., Felizzia, J. Application of isotope techniques to enhance the conceptual hydrogeological model and to assess groundwater sustainability in the Pampean plain in Córdoba, Argentina. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1-16 (2020a).

Blarasin, M., Cabrera, A., Giacobone, D., Lutri, V., Currell, M., Cabrera, A.E., Matteoda, E., Giuliano Albo, J., Cendon, D., Ma, X., Eric, C., Felizzia, J. Using isotopes to evaluate relationships between groundwater age, flow systems and pollution by pesticides. *I Taller Regional de Ecohidrología Isotópica*. IMASL, San Luis, Argentina. Póster (2020b).

Cabrera, A., Blarasin, M., and Maldonado, L. Groundwater age and hydrothermalism of confined aquifers in the Argentine Pampean plain. *Geothermal Energy*, 5(1), 6 (2017).

Cantú, M. P., and Degiovanni, S. B. Geomorfología de la región centro sur de la provincia de Córdoba. In *IX Congreso Geológico Argentino*, Asociación Geológica Argentina. Acta Vol. 4, pp. 76-92 (1984, November).

Carignano, C. A. Late Pleistocene to recent climate change in Córdoba Province, Argentina: Geomorphological evidence. *Quaternary International*, 57, 117-134 (1999).

Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, S., and Cioccale, M. Geomorfología. *En Relatorio XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba.* Asociación Geológica Argentina, pp. 747-822 (2014).

Clark I. *Groundwater geochemistry and isotopes*. Boca Raton (FL): CRC Press (2015).

Código Alimentario Argentino. Res. 191/91. *Boletín Oficial Nº 27.932*, 1º sección, Art. 982 modificado (1991).

Giacobone, D., Blarasin, M., Lutri, V., Cabrera, A., Cendon, D.I., Currell, M., Cabrera, A.E., Matteoda., E., and Aparicio, V. Evaluación hidrogeológica e isotópica de capas acuíferas y su relación con presencia de atrazina en la planicie loésica de Córdoba. Argentina. In *VIII Congreso Latinoamericano de Agroecología* (2020).

Giuliano Albo, M. J. Evaluación de la contaminación por nitratos en aguas subterráneas de agroecosistemas mediante el uso de isótopos estables 15N-14N, 18O-16O, y otros solutos relacionados. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 399 p., Río Cuarto (2013).

Iriondo, M. Antiguedad del último cambio climático en el Litoral. *Ecología* (1981).

Iriondo, M., & Kröhling, D. Geomorfología y sedimentología de la cuenca superior del rio salado (sur de santa fe y noroeste de Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and basin analysis*, 14(1), 1-23 (2007).

Kazemi G, Lehr J and Perrochet P. *Groundwater age*. Hoboken (NJ): Wiley (2006).

Maldonado, M.L., Blarasin, M. T., Cabrera, A. E., Panarello, H. O., and Dapeña, C. Assessing groundwater age in confined aquifers from the central Pampean plain of Córdoba, Argentina. *Radiocarbon*, 58(4), 833 (2016).

Polare, H.M. *Comportamiento del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá. Provincias de Santa Fe y Córdoba, República Argentina.* Tesis de Magíster, Universidad Nacional de Rosario (inédita), Rosario (2019).
QGis Desktop 3.6.1. (2019).
Riverside. U.S. Salinity Laboratory Staff. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. U.S.* Department of Agriculture Handbook Nº60. Washington (1954).
Simler, R. Diagrammes v5.1 (2014).

DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UN ÁREA URBANA FORESTADA, A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

Giovenale, V.[a] y Gaspari F.J.[a]

[a] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA.*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

Investigar sobre la dinámica hídrica superficial en las áreas que han ido cambiando producto de los procesos de urbanización en las zonas costeras, es de mucho interés para la sociedad local y regional de un determinado lugar. El área objeto de estudio corresponde al cordón costero bonaerense en la localidad de Mar de Las Pampas, Villa Gesell. Ésta se encuentra afectada por escorrentía superficial e inundaciones temporales. El uso recreativo y turístico por parte de la comunidad representa una potencial degradación por la sobreutilización del recurso suelo-vegetación. El objetivo de este trabajo fue caracterizar el ambiente identificando las restricciones físicas y las vinculadas al estado de la vegetación y uso del suelo. Para ello se realizó la modelización hidrológica del estado actual de un área representativa. Mediante procesamiento de imágenes satelitales y estudios a campo se zonificaron las diferentes áreas (forestales, urbanas, viales, desnudas) en función de su grado de urbanización, tamaño y uso actual del suelo. La cuantificación del escurrimiento superficial se estimó por el método del Número de Curva (NC), que establece complejos suelo-vegetación a los cuales les asigna un valor de NC que define sus condiciones hidrológicas. La estimación del escurrimiento superficial en relación con varios eventos pluviales de baja, media y alta intensidad, permitió evaluar y cuantificar la acción degradativa de una tormenta. Se obtuvo que, del total del área estudiada, el rango menor a 30 de NC no se detecta en la superficie, el 5,57% NC entre 30-60 y el 94,43% NC >60, variando de forma significativa el riesgo de erosión por escurrimiento generado en cada caso de estudio. El trabajo generó información y herramientas geoespaciales tendientes a la conservación y uso de suelo por acción de erosión hídrica y/o inundaciones, que permitan planificar el manejo integrado y orientar futuras investigaciones, proponiendo medidas no estructurales que contribuyan al desarrollo sustentable.

Palabras claves: Urbanización, Forestación, Simulación hidrológica, Riesgo erosión.

INTRODUCCIÓN

Investigar sobre la dinámica hídrica superficial en las áreas que han ido cambiando producto de los procesos de urbanización en las zonas costeras es de mucho interés para la sociedad local y regional de un determinado lugar.

El área objeto de estudio corresponde al cordón costero bonaerense en la localidad de Mar de Las Pampas, Municipio de Villa Gesell, provincia de Buenos Aires, que abarca 286,42 ha. (ver Fig.1). Esta área forma parte de lo que corresponde a una formación de médanos uniforme que recorre el litoral marítimo, a lo largo de 180 kilómetros, desde el inicio del mar argentino en Punta Rasa y que culmina en la albufera de Mar Chiquita (Orellano et al., 2003). Según Orellano et al. (2003) para el año 2000, la región costera bonaerense presentaba una superficie de 8.900 ha forestadas.

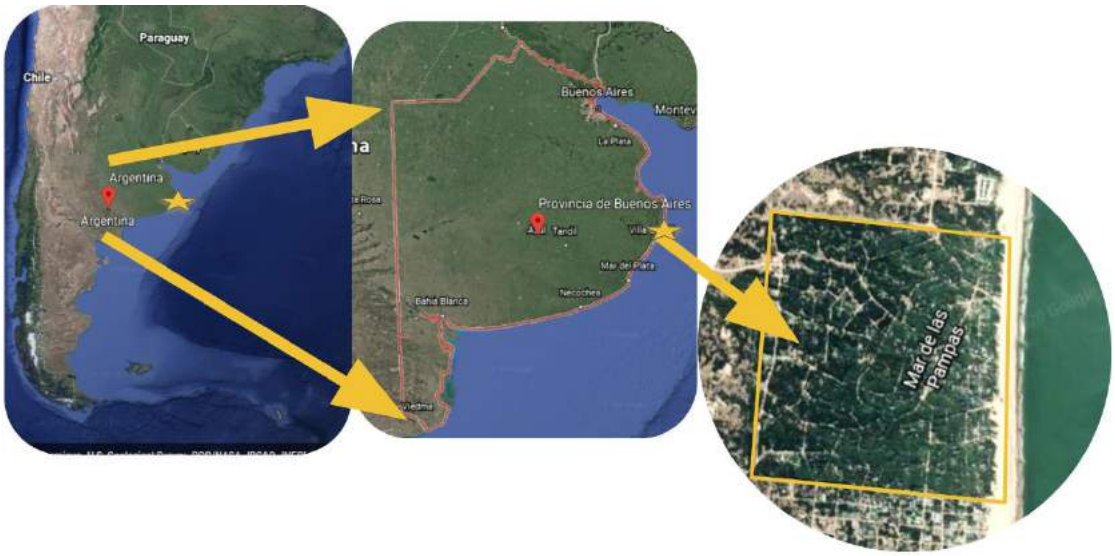


Figura 1. Mapa de localización de Mar de las Pampas, Villa Gesell, provincia de Buenos Aires, Argentina. Fuente Google Earth. Elaboración propia.

Esta región presenta la mayor concentración de asentamientos turísticos, con 15 urbanizaciones principales y diversas modalidades de inclusión del árbol en el paisaje turístico según la localidad, como ser en forma de forestaciones monoespecíficas, parches de distintas especies y árboles individuales. Las mismas proveen diversos servicios ambientales (SA) entre los cuales se percibe la fijación y el almacenamiento de carbono y la contribución, en mayor o menor medida, al desarrollo del turismo y recreación (Gaspari el al., 2019).

La localidad costera de Mar de las Pampas presenta un paisaje urbano producto de la antropización de la costa bonaerense, como muchas otras localidades, en las que se han ocurrido cambios en el tipo de cobertura y uso de suelo a lo largo de los últimos 40 años.

El paisaje urbano se define como la relación de rasgos visibles de las interacciones biofísicas y culturales que interactúan dentro de entornos artificialmente construidos (Hernández Guerrero, 2020). Estos cambios de uso de suelo, genera un aumento de superficies menos permeables que expresa una disminución en la infiltración del suelo y crecimiento en los valores de escurrimiento superficial, que se acrecienta según la

intensidad y duración de las tormentas, provocando anegamientos e inundaciones temporales en las calles y otras infraestructuras urbanas.

El área en estudio, en la localidad de Mar de Las Pampas, presenta un uso recreativo y turístico por parte de la comunidad local y regional. Este uso intenso establecido en diferentes estaciones del año y/o en fines de semana puntuales, expresa un alto potencial de degradación por la sobreutilización del recurso suelo-vegetación, generando una gran preocupación e inquietud en la sociedad local y regional, siendo una de ellas la ocurrencia de inundaciones temporales durante eventos pluviales torrenciales, debido al excesivo escurrimiento superficial. Esto es importante en los procesos de erosión hídrica superficial de los suelos, la cual genera fragilidad en el ambiente (Gaspari el al., 2013).

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar el ambiente identificando las restricciones físicas y las vinculadas al estado de la vegetación y uso del suelo por medio de la determinación de la respuesta hidrológica de un área urbana forestada, con un modelo de simulación lluvia-escorrentía.

MÉTODOS

La estimación de la dinámica hídrica superficial en relación con la ocurrencia de las precipitaciones permitió cuantificar, evaluar y zonificar la acción degradativa de una tormenta torrencial en Mar de Las Pampas. El ciclo se inicia cuando comienza a llover, donde una parte del agua precipitada queda retenida en la vegetación, otra inicia el proceso de infiltración y el resto genera escurrimiento. A medida que transcurre la precipitación, el proceso de infiltración tiende a saturar el suelo y el escurrimiento aumenta. De ello se deduce que el escurrimiento se distribuye contemplando sus características particulares, el suelo y cobertura vegetal y/o uso (Gaspari el al., 2013).

Para cumplir con el objetivo planteado, se procedió a la cuantificación del escurrimiento superficial, que se estimó por el método del Número de Curva, del Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service (SCS), United States Department of Agriculture). Es un método sencillo para calcular la lluvia efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad según el suelo (Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari el al., 2013).

Este método establece complejos suelo-vegetación a los cuales se les asigna un valor, denominado Número de Curva o Número Hidrológico (NC), que define sus condiciones hidrológicas, el cual está adaptado para situaciones diferenciales de sitio, considerando el suelo (Grupo hidrológico) y la cobertura vegetal y uso.

Para su estudio se procedió a la zonificación del tipo de suelo con información de estudios antecedentes, entre ellos se dispuso del material de INTA. Posteriormente se procedió a la determinación del grupo hidrológico (GH) que se llevó a cabo mediante el análisis textural de los resultados mencionados y de calicatas realizadas por técnicos de la cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Fac.Cs. Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata.

Posteriormente, se procedió mediante, el procesamiento de imágenes satelitales y recorridas a campo, a la zonificación de usos de suelo y tipo de cobertura vegetal.

Conocido el GH y la cobertura vegetal que le corresponde al terreno en estudio, se consideró la condición de humedad antecedente en el suelo, es decir el estado de humedad

del suelo previo a la precipitación. La misma se define por tres condiciones básicas, considerando el contenido de humedad del suelo, determinado en base a una lluvia ocurrida dentro de los 5 a 10 días previos. Se denomina seca (I) si es menor a 12,5 mm, media (II) si la precipitación fue entre 12,7 – 38,1 mm y húmeda (III), con valores mayores a 38,1 mm. (Gaspari el al., 2013).

Como no toda la superficie estudiada es uniforme en cuanto a uso de suelo y/o tipo de cobertura vegetal, se calculó un NC medio ponderado para la zona en estudio por medio de la ecuación 1 (Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari el al., 2013).

$$NCp = 1/A \sum (A_1*NC_1 + A_2*NC_2 + A_3*NC_3 + \ldots + A_n*NC_n) \qquad (1)$$

Donde:

A: Área total de la cuenca.

An: Área del polígono correspondiente al NCn.

NCn: Número de curva del polígono

n : Número de polígonos de diferente NC.

Seguido se calculan las Pérdidas iniciales I_o como el producto entre 0,2 y S, siendo S, la retención potencial máxima y surge de la ecuación 2.

$$S = 254 * ((100/NC) -1) \qquad (2)$$

El escurrimiento directo (superficial) Q se calculó mediante la ecuación 3.

$$Q = (P - I_o)^2 / (P - I_o + S) \qquad (3)$$

Donde:

P: es la precipitación en mm.

I_o: es la abstracción inicial.

S: es el máximo potencial de retención de la cuenca ante un evento de tormenta.

A partir de los cálculos anteriores, se realizó un gráfico de barras de un hietograma diferenciando para cada NC, para una lámina de precipitación, en el que las columnas apiladas representan lo que escurre y abstracciones.

Para el estudio se analizaron datos pluviales de estaciones meteorológicas cercanas, donde se evidenciaron dos tormentas de alta intensidad. Estas se estudiaron según la condición de humedad antecedente y agresividad. Para ello se tuvo en cuenta que el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de escorrentía (Io), es decir que los cálculos se realizaron a partir del período donde la precipitación acumulada es mayor que Io. Si $Io < P1 \Rightarrow Q1 = 0$.

La lámina de escurrimiento en cada uno de los períodos será la diferencia entre el escurrimiento total ocurrido hasta dicho período y el ocurrido en el intervalo precedente. Así, si $Io > P1$ se calcula el escurrimiento del período 1 con la ecuación 3. Se comparan todas las precipitaciones de cada intervalo y el escurrimiento se va definiendo como la diferencia entre el escurrimiento del intervalo y el anterior.

Por último, se definió el coeficiente de escurrimiento (CE) como el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el caudal total precipitado (P) como la expresión: CE = Q/P.

Este estudio se realizó para las tres condiciones de humedad considerando momento de sequía (Condición I), periodo húmedo (Condición III) y condición media II.

El procesamiento y análisis de cada mapa de zonificación generado (GH, cobertura vegetal y NC) se llevó a cabo con Sistema de Información Geográfica (SIG) procesado con el software QGIS Madeira.

RESULTADOS

En la Figura 2 se presenta el mapa de tipos de suelos definidos en Mar de Las Pampas, elaborado a partir de información propia, definiendo un cordón arenoso costero hasta 100 metros aproximadamente. Estos médanos se conforman con suelos Torripsament típicos, sin desarrollo, excesivamente drenados, sin signos de alcalinidad. Luego se adentra una faja de 130 m paralela con suelos suavemente ondulados de médanos vegetados estabilizados, con Haplustol arídico y Haplustol éntico, con desarrollo incipiente y algo excesivamente drenados. Por último, hacia la zona continental, se presentan suelos formados son Hapludoles énticos más desarrollados, pero también algo excesivamente drenados. Según INTA la zona se caracteriza por un suelo pardo grisáceo, poco profundo y con escaso desarrollo, de aptitud ganadera, que se encuentra en un paisaje muy ondulado de Dunas Costeras, en posición de bajo, en la Subregión Llanuras Marinas, excesivamente drenado, formado sobre arenas de origen eólico, alcalinidad sódica desde la superficie, no salino, con pendientes de 0 a 1 % (ver Fig.2). En todos los casos las textura predominante es arenosa, expresando un GH A.

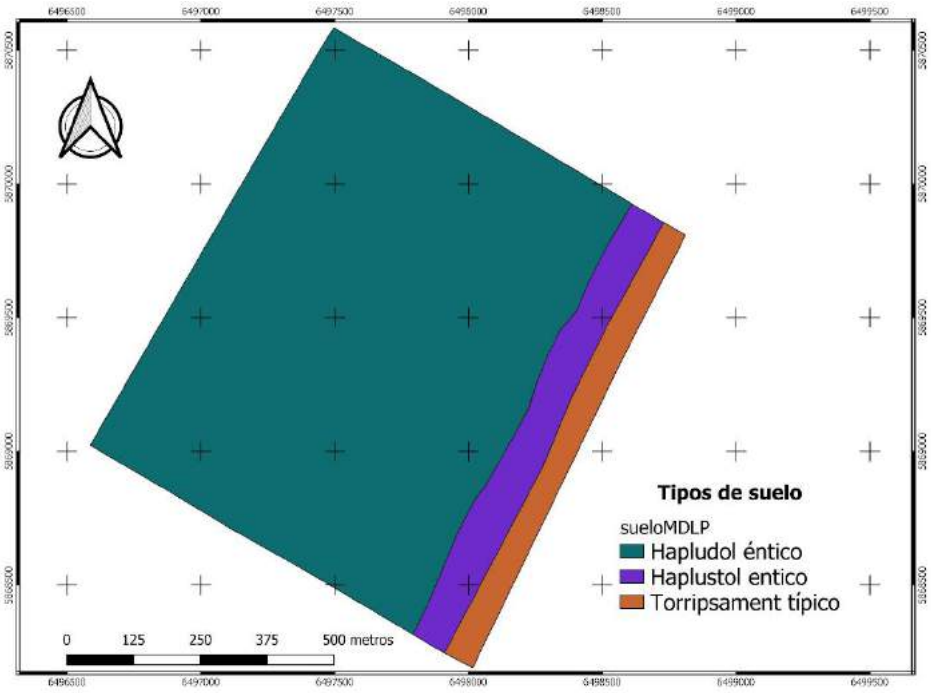


Figura 2. Mapa de tipos de suelos de Mar de las Pampas, Villa Gesell, Prov.Buenos Aires, Argentina.

La zonificación de la cobertura vegetal en Mar de Las Pampas se visualiza en la Figura 3, donde se expresan los siguientes tipos: Forestal Claro Urbano residencial (20,8%),

Forestal Claro (0,8%), Forestal Claro Público no urbanizable (2,9%), Forestal Claro Residencial hotelero/comercial (6,9%), Forestal Claro Cordón dunoso (2,1%), Forestal Oscuro Urbano residencial (24,5%), Forestal Oscuro Público no urbanizable (0,6%), Forestal Oscuro Residencial hotelero/comercial (0,5%) y Desnudo/sin cobertura (40,8%), coincidente con el trabajo de Gaspari et al (2019).

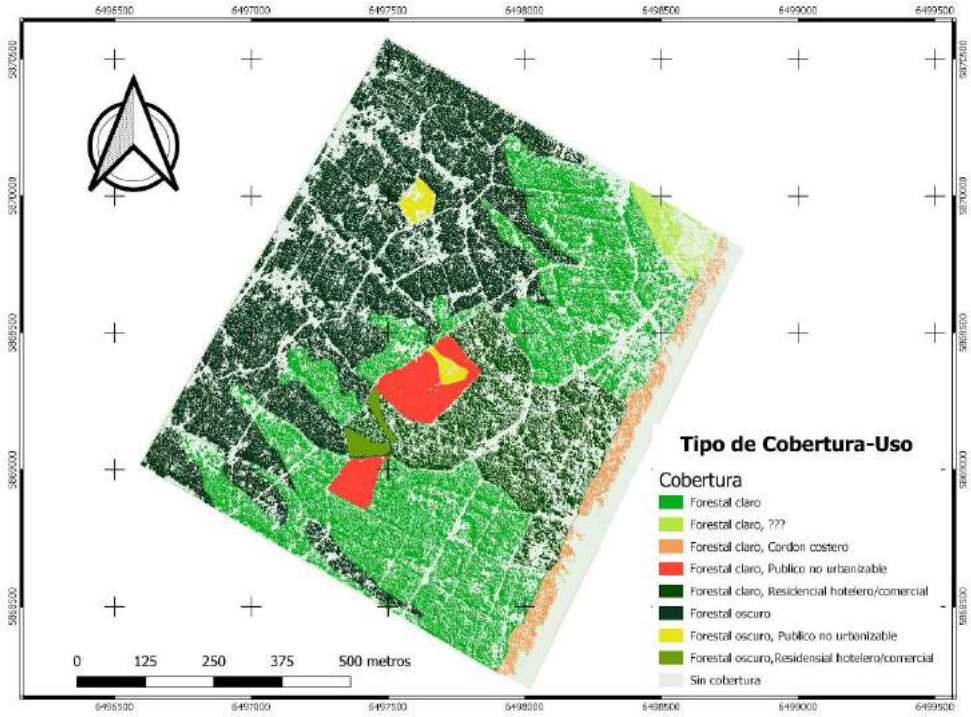


Figura 3. Mapa de cobertura vegetal y usos de suelo para la localidad de Mar de las Pampas. Fuente: adaptación Gaspari et al. 2019.

A partir de los mapas de los grupos hidrológicos, los usos de suelos y/o vegetación y considerando la condición de humedad antecedente, se asignaron los NC según tabla I.

Tabla I. NC según condición de humedad antecedente.

Tipo de cobertura-Usos de suelo	Superficie (ha)	GH	NC I	NC II	NC III
Forestal Claro. Urbano Residencial	59,63	A	59	77	92
Forestal Claro	2,35	A	59	77	92
Forestal Claro, Cordón Dunoso	5,88	A	34	54	74
Forestal Claro Público No Urbanizable	8,24	A	20	36	56
Forestal Claro Residencial Hotelero/Comercial	19,89	A	59	77	92
Forestal Oscuro. Urbano Residencial	70,13	A	41	61	80
Forestal Oscuro Público No Urbanizable	1,82	A	20	36	56
Forestal Oscuro Residencial Hotelero/Comercial	1,53	A	41	61	80
Sin cobertura	116,91	A	58	76	92

Del cruzamiento entre el cobertura vegetal y uso de suelo con los grupo hidrológicos y aplicando la Tabla I, se obtuvieron los NC de la condición de humedad antecedente II, como se muestra su zonificación en la Figura 4.

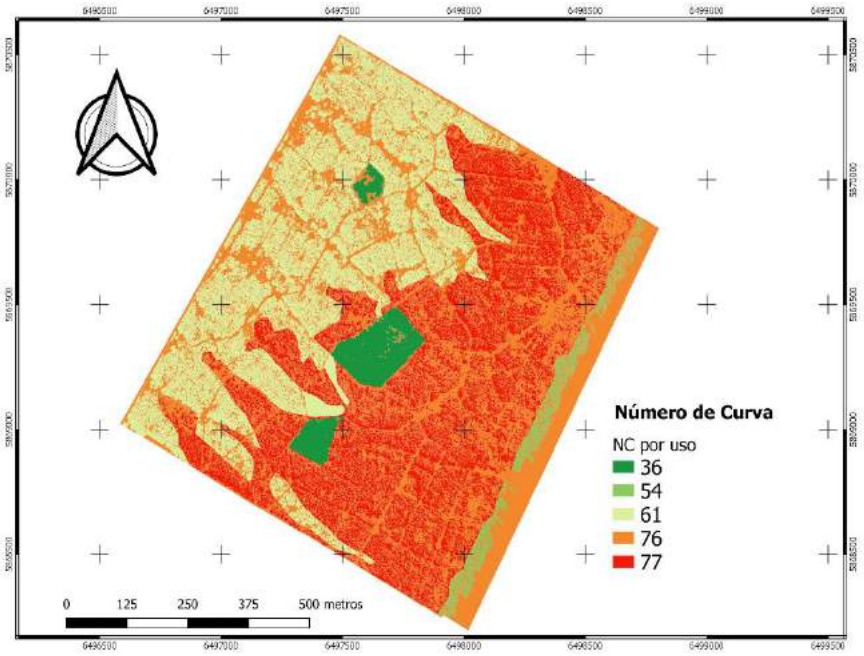


Figura 4. Mapa de NC Condición II para la localidad de Mar de las Pampas.

A partir de los resultados alcanzados del análisis de los datos pluviales, se diferenciaron dos eventos con los cuales se generó su hietograma y curva de masa de lluvia, como se muestra en las Figuras 5a y 5b. Los dos eventos analizados corresponden al 5 de febrero del 2017 y al 27 de diciembre del 2018. Comparativamente, la primer tormenta tuvo una masa de lluvia de 80 mm y la segunda de 67,6 mm.

Se eligieron estas tormentas por su intensidad, para el análisis de la ocurrencia de escorrentía superficial. La duración de estas no fue igual, por ello se analizaron en distintos intervalos de tiempo, cada una hora la primer tormenta que duró 840 minutos y cada treinta minutos la segunda que duró 300 minutos. En la misma área una tormenta de mayor caudal generó mayor escorrentía.

Se comparó la agresividad de los eventos considerados. La tormenta de menor masa de lluvia presentó mayor intensidad debido a la relación precipitación/tiempo; la tormenta de mayor masa de lluvia duró más tiempo y ese fue el factor que determinó su agresividad.

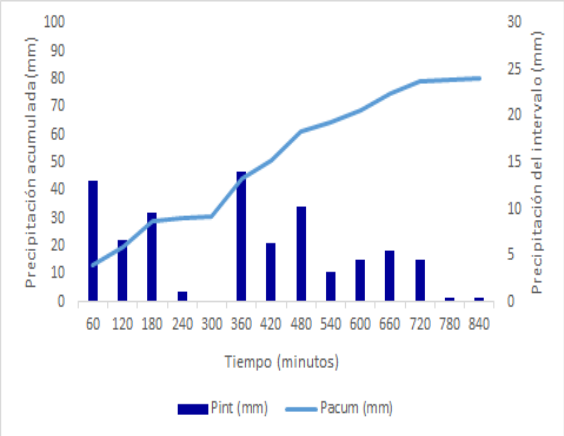


Figura 5a. Hietograma y curva de masa de lluvia de una tormenta de 80 mm.

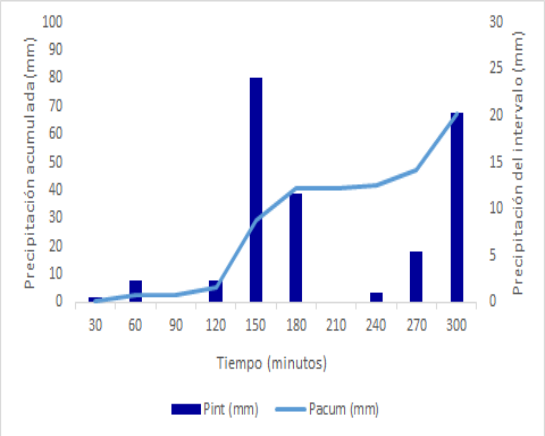


Figura 5b. Hietograma y curva de masa de lluvia de una tormenta de 67,6 mm.

Las tormentas analizadas provocaron anegamientos e inundaciones temporales en las calles de la localidad, como se muestra en las Figura 6, particularmente durante el evento del 5 de febrero del 2017.



Figura 6. Fotos tomadas 06 de febrero del 2017. Fuente Activa. Sociedad en Acción, 2017.

Este temporal, también golpeó la ciudad de Villa Gesell con fuertes ráfagas de viento ocasionando la caída de más de cien árboles y postes de luz, además de voladura de techos.

La agresividad de la tormenta en Mar de Las Pampas generó caída de árboles, cortes de luz, etc., coincidente con los resultados obtenidos de la simulación de lluvia-escorrentía. Estos anegamientos se verificaron en el uso de suelo clasificado como Sin cobertura que representan calles, zonas sin forestación.

A continuación, se presenta la zonificación de Q para cada tormenta aplicando la Ec.3.

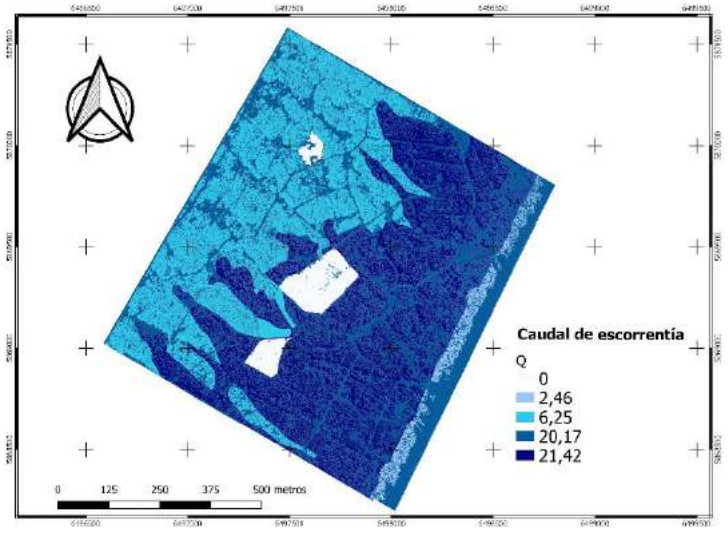


Figura 7a. Mapa Caudal de escorrentía Q (mm) para Mar de las Pampas, tormenta del día 27/12/18.

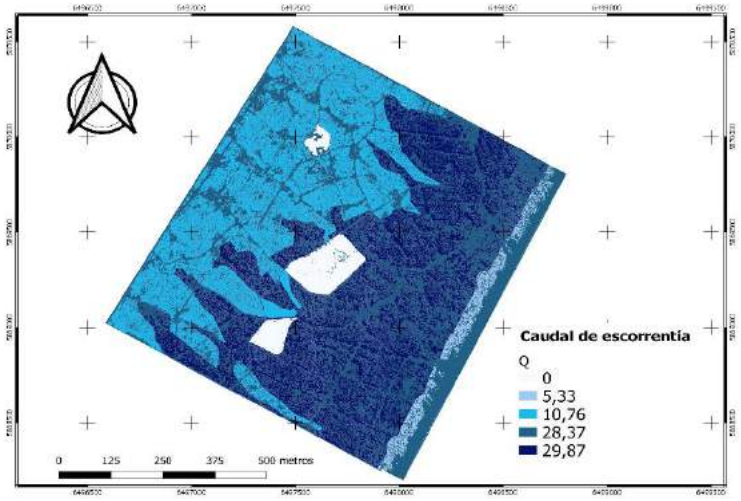


Figura 7b. Mapa de Caudal de escorrentía Q (mm) para Mar de las Pampas, tormenta del día 5/2/17.

Del análisis se estableció el CE (coeficiente de escorrentía) correspondiente a cada NC, para las tormentas analizadas, cuya zonificación se expresa en las Figura 8 a y b según las tormentas estudiadas.

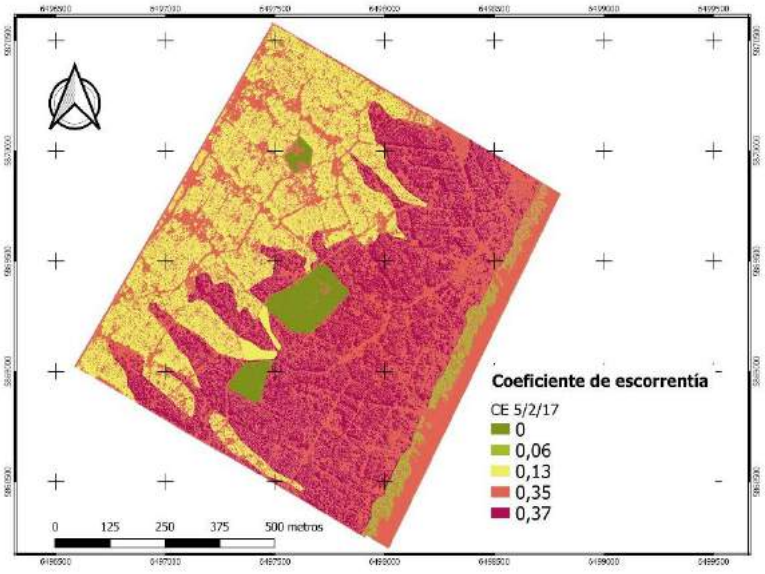


Figura 8a. Mapa de coeficiente de escorrentía (CE) generados por la tormenta del 05/02/2017 en Mar de las Pampas.

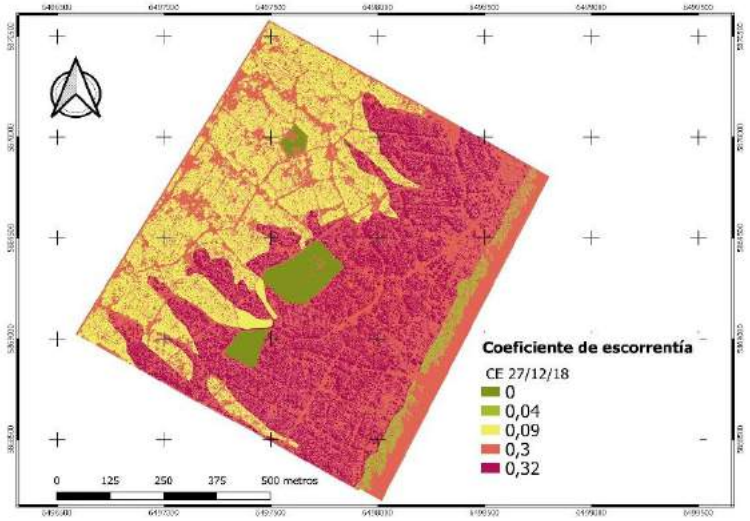


Figura 8b. Mapa de coeficiente de escorrentía (CE) generados por la tormenta del 27/12/2018 en Mar de las Pampas.

Relacionando los CE de cada tormenta se generaron los gráficos correspondientes a cada NC de la condición de humedad antecedente II como muestran las figuras 9a y b, correspondientes a las tormentas de 80 mm (5/2/17) y de 67,6 mm (27/12/18) respectivamente.

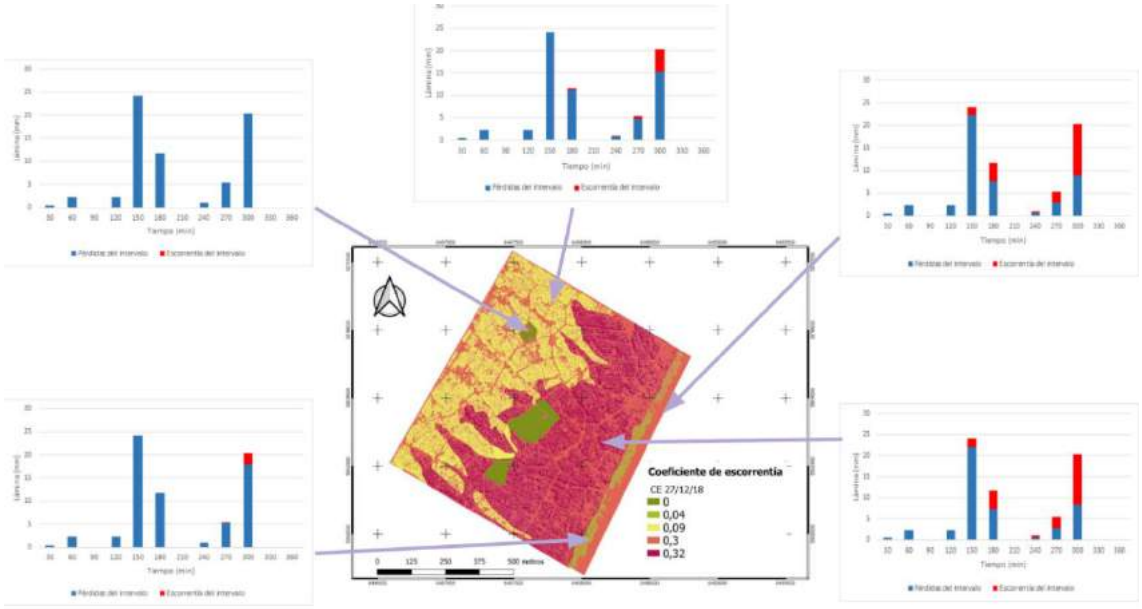


Figura 9a. Hietograma de precipitación-escorrentía y su ubicación en el área de estudio tormenta del 27/12/18.

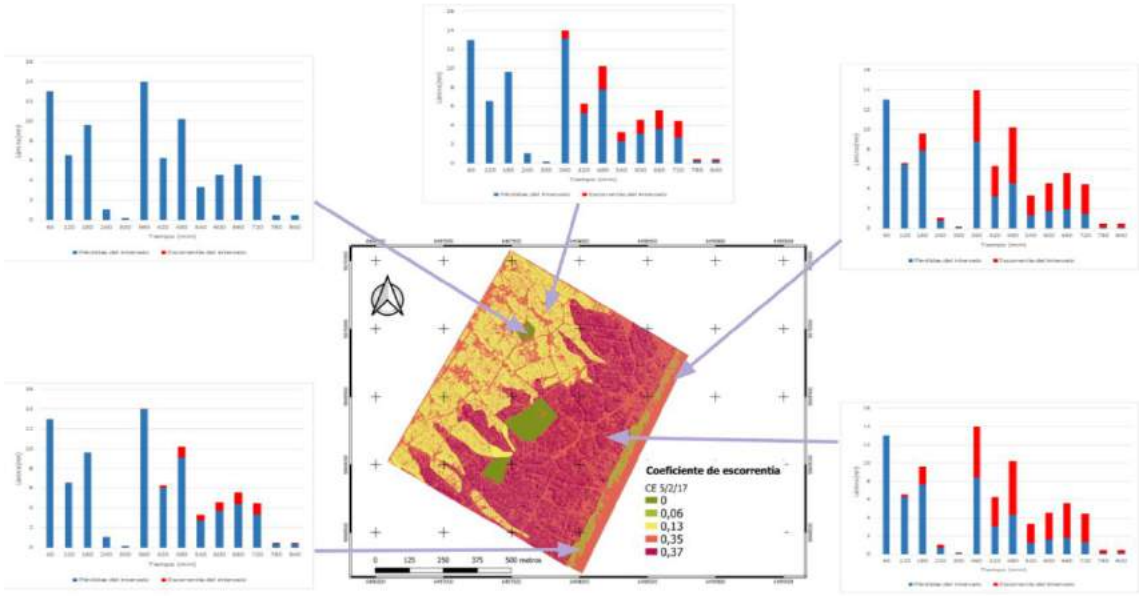


Figura 9b. Hietograma de precipitación-escorrentía y su ubicación en el área de estudio tormenta del 05/02/17.

CONCLUSIONES

En base a los resultados se demostró que producto de una precipitación intensa, en el área estudiada, se genera escorrentía que favorece a la erosión hídrica superficial.

La mayor proporción de lluvias intensas en verano han ido provocando una alteración de la estructura vial en la localidad en estudio, se recomienda mayor mejoramiento de estas para minimizar el deterioro.

Para ello se planteó recopilar y generar información y herramientas generales de conservación y uso de suelo para Mar de Las Pampas, que permitan planificar el manejo integrado y orientar futuras investigaciones, proponiendo medidas de carácter cartográfico que contribuyan al desarrollo sustentable.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado "El arbolado urbano en dunas costeras. Interacción y aprendizaje del entorno forestal", del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaría de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A287. 2016-2019.

Al señor Patricio O'neill, responsable de la estación meteorológica dependiente de Telpin (Cooperativa Telefónica de Pinamar).

A la señora Mariana Dabadie quien colaboró en el tratamiento de las muestras de suelos en el CEIDE (Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena).

REFERENCIAS

Fernández de Villarán, R. Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del Número de Curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido. Huelva: Universidad de Huelva (tesis doctoral). 402 págs. (2006).

Gaspari, F., Denegri, G., Rodríguez Vagaría, A., Cellini, M., Acciaresi, G. Forest ecosystem services: carbon storage in urban forests located on the Atlantic coast in Buenos Aires province (Argentina). II Jornadas Internacionales de Ambiente y IV Jornadas Nacionales de Ambiente 2018. 157 160 pp. (2019).

Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Montealegre Medina F. Manejo de cuencas hidrográficas. Herramientas de sistemas de información geográfica. Libro de cátedra. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 120 p. La Plata. Argentina. Primera Edición. (2019).

Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., Besteiro, S. Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. La Plata. Argentina. Junio de 2013. Actualización permanente SEDICI.ISBN 978-950-34-0963-3. Versión digital. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877. (2013).

Hernández Guerrero, J. A. Valoración del paisaje urbano-ambiental de Juriquilla y Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, México. *Economía, Sociedad y Territorio, vol. xx,* núm. 64, 2020, 633-666. DOI: https://doi.org/10.22136/est20201608. (2020).

Inta. Descripción de cartas de suelo de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:50.000. (1989).

Mongil Manso, J., Luis Rosado, E. Adaptación de las tablas del Número de Curva para las principales formaciones vegetales naturales de la provincia de Ávila. Publicación en *Cuadernos abulenses*, ISSN 0213-0475, Nº. 41, 2012, págs. 145-165. (2012).

SONDA NEUTRÓNICA PARA EXPLORACIÓN URANÍFERA. CORRECCIÓN POR STANDOFF

Gómez Méndez I.[a] y Mayer R. E. [b,c]

[a]*Departamento de Separación Isotópica, Complejo Tecnológico Pilcaniyeu – Centro Atómico Bariloche, CNEA, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Física de Neutrones, Centro Atómico de Bariloche, CNEA, ARGENTINA*
[c]*Instituto Balseiro, UNCuyo, ARGENTINA*

e-mail: ianna.gomez@cab.cnea.gov.ar

RESUMEN

Argentina como país nuclear necesita sustentar su ciclo del combustible. Es importante potenciar la primera etapa de este aplicando métodos eficientes de exploración uranífera. Convencionalmente, en la etapa de caracterización del yacimiento, se utilizan métodos geofísicos de pozos, como los registros de gamma natural total o espectrométrico (U, Th y K), que estiman indirectamente la concentración de uranio basándose en la cadena de desintegración del ^{238}U, suponiendo un equilibrio secular. No siendo siempre así, Bennun L. et al. (2009) y Arsen A. (2017) proponen emplear una sonda neutrónica pasiva que mida directamente su concentración al detectar neutrones de la fisión espontánea del ^{238}U (13,6 neutrones$\cdot s^{-1}\cdot kg^{-1}$), independientemente del grado de equilibrio. Los métodos neutrónicos, sin embargo, dependen del contenido de hidrógeno (agua) en el sistema, por su alto poder de moderación; por tanto, la ley de uranio dependerá de las cuentas del detector, sus características, tiempo de medición y humedad. En este trabajo, se realizaron mediciones experimentales en un símil de yacimiento uranífero, utilizando dos detectores con diferente respuesta a la moderación del sistema, para estimar la humedad del medio según el cociente de cuentas. Se analizó la influencia del lodo de perforación (mayormente agua) en el espacio entre la herramienta de medición y la pared del pozo (standoff), simulando sus espesores a partir de láminas de polietileno agregadas y se propuso un coeficiente de corrección por standoff, para no sobreestimar la humedad del medio. Estos resultados tributan a que se estime mejor la humedad de la formación y por tanto el contenido uranífero, en una etapa de continuidad de este trabajo, en una central de calibración. Se sugirió una metodología para la aplicación del método propuesto.

Palabras Clave: Sonda, Neutrones, *Standoff*, Ley, Uranio

INTRODUCCIÓN

El uranio es un elemento natural que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, normalmente en bajas concentraciones (de 2 a 4 ppm) según Hansen (1981), excepto cuando está formando depósitos donde su ley puede alcanzar desde 0,01 hasta más de 20 % (I.A.E.A., and I.N.F.C.I.S., 2019). Se manifiesta principalmente como dos isótopos, ^{238}U y ^{235}U, representando el 99,27 % y 0,73 % respectivamente, siendo este último el isótopo físil, base para las reacciones nucleares en los reactores de potencia y de investigación. El mineral de uranio es el punto de partida del ciclo combustible nuclear. En la actualidad en Argentina, este ciclo es abierto y consta de varias etapas: la prospección y exploración, la explotación, la purificación y conversión, el enriquecimiento, la fabricación del combustible, la fisión nuclear y el almacenamiento.

La primera etapa del ciclo consiste en la búsqueda y estudio de yacimientos uraníferos para considerar si es factible su explotación. Durante la prospección se emplean métodos geofísicos aéreos y de superficie con el objetivo de detectar anomalías que indiquen la presencia de yacimientos. Luego, en la exploración, se emplean métodos geofísicos de pozos y geoquímicos, para caracterizar al yacimiento prospectado en lo que se refiere a su ley y cuantificación de reservas. Esta primera etapa en Argentina, está liderada por la Comisión Nacional de Energía Atómica (C.N.E.A.).

Argentina es el tercer país con mayores reservas uraníferas identificadas en Latinoamérica, luego de Brasil y Perú, con aproximadamente 31000 tU, teniendo como principales depósitos a Sierra Pintada, en Mendoza, y Cerro Solo, en Chubut (I.A.E.A., and N.E.A., 2018). Además, cuenta con los recursos necesarios para desarrollar su ciclo nuclear de manera autónoma, excepto que, en el marco legal, la minería del uranio se encuentra muy limitada. Las minas que se explotaban desde 1952 cerraron en 1997; por lo que, en la actualidad, el país necesita importar aproximadamente 250 tU/año para abastecer sus tres centrales nucleoeléctricas (Barbarán, 2015).

Mientras se restablece un marco legal más favorable para el desarrollo minero en el país, se deben fortalecer las otras aristas del sector, como lo es la etapa de exploración de los yacimientos uraníferos ya prospectados, en la que se enmarca este trabajo.

Para la exploración de uranio, usualmente se integran los resultados de los registros de resistividad eléctrica y de intensidad de radiaciones gamma (*gamma ray*), para vincular litología del yacimiento con la concentración de uranio (I.A.E.A., 1986). El ^{238}U no es emisor gamma, pero en su serie de decaimiento radiactivo (ver Fig. 1) tiene cinco hijas que sí lo son, en particular, el ^{214}Pb y el ^{214}Bi, que provienen del ^{222}Rn de la propia cadena. Si el padre no se encuentra separado de las hijas en su matriz rocosa, entonces existe equilibrio secular radiactivo, y se puede relacionar la ley de mineralización del uranio directamente con la intensidad gamma medida.

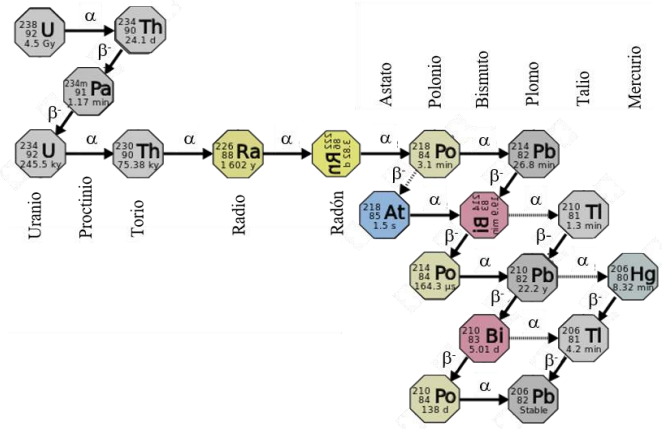


Figura 1. Cadena de decaimiento del ^{238}U.

Sin embargo, este equilibrio no es frecuente en los yacimientos (del tipo sedimentario), sobre todo si se intervienen y modifican para su estudio. El padre puede estar separado de sus hijas por dos factores fundamentales (Broding, and Rummerfield, 1955): procesos geoquímicos, que cambian el estado de oxidación del mineral de uranio, variando su solubilidad (en medios ácidos) y capacidad de traslado desde el depósito original (Bennun et al., 2009) y/o el hecho de que el ^{222}Rn sea un gas noble y escape.

Basados en este argumento, Korochinsky (1995), Bennun et al. (2009) y Arsen (2017) propusieron la determinación directa de la ley de mineralización de uranio a partir de métodos neutrónicos, es decir, basándose en la detección de neutrones, que provienen de la fisión espontánea del ^{238}U, que según Reilly et al. (1991) emite 13,6 $n \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$. Usar este método implicaría un avance notable pues se podría cuantificar la concentración de uranio independientemente del grado de equilibrio del yacimiento, lo que disminuiría la incerteza en el análisis de reservas y factibilidad de su explotación.
Debido a que la formación uranífera funcionaría como una fuente de neutrones de baja intensidad, se necesitan detectores de neutrones de alta eficiencia y mediciones por largos períodos de tiempo (*t*). En la medición influirían estos factores, pero además, estaría afectada notablemente por el poder de moderación y/o absorción del medio, que mayormente se debe a la presencia de hidrógeno en los poros del yacimiento (proporcional a su humedad) (Ellis, and Singer, 2008). En trabajos anteriores, según simulaciones numéricas, se diseñó una sonda neutrónica prototipo con dos detectores de diferentes poderes de moderación *Dd* y *Dc*, cuyo cociente de cuentas (C_{Dd}/C_{Dc}) se relaciona directamente con la humedad de la formación (*H*); mientras que la ley de uranio (*U*) se estima a partir de las cuentas de uno de los detectores (C_i) (ver Ecs. 1 y 2).

$$Ci = ki * U * t * fi(H, Di) \tag{1}$$

$$\frac{C_{Dd}}{C_{Dc}} = \frac{k_{Dd} * f_{Dd}(H,Dd)}{k_{Dc} * f_{Dc}(H,Dc)} = f_{Dd,Dc}(H, Dd, Dc) \tag{2}$$

En este trabajo se consideró además la influencia moderadora y/o absorbedora del agua del lodo de perforación que estaría presente en el espacio entre la pared del pozo y la superficie de la herramienta de medición, llamado *standoff*, efecto que se corrige tanto si se registra a la vez que se perfora (Logging While Drilling) o si se registra después de la perforación, a caño abierto (ver Fig. 2).

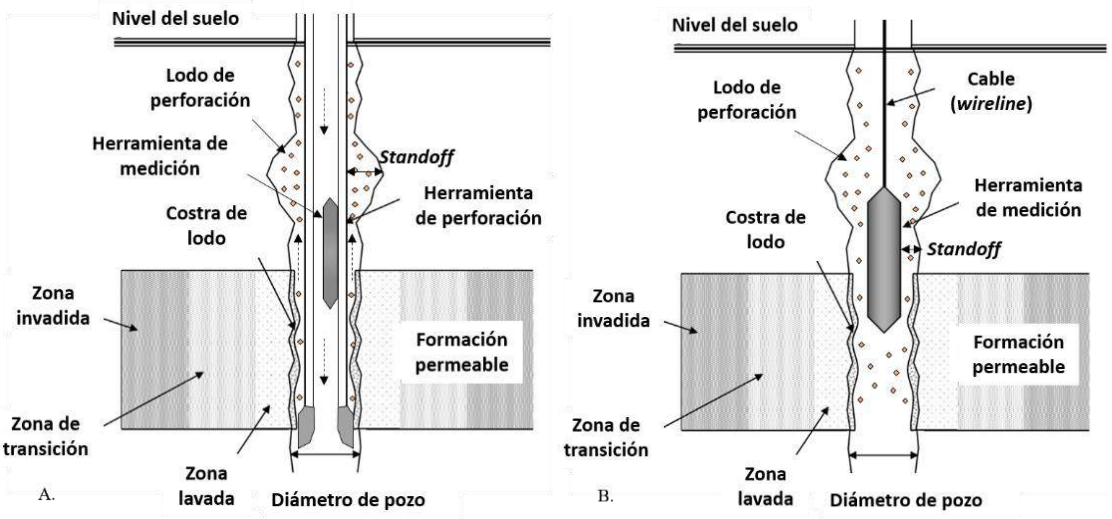


Figura 2. Esquema del proceso de registros de pozos, donde se marcan el lodo de perforación, la costra del lodo y el *standoff*, parámetros que se corrigen de acuerdo a su efecto en cada propiedad medida. A. Registro mientras se perfora (Logging While Drilling LWD). B. Registro a caño abierto. Modificado de Baker (2015).

Este es un parámetro que normalmente se corrige en los registros de resistividad y neutrónicos clásicos de pozo, para evitar interpretaciones litológicas erróneas y para no sobreestimar la porosidad neutrónica (proporcional a la humedad de la formación). Esta distancia se puede medir con la herramienta *caliper* que mide el diámetro del pozo.
En este trabajo, se propuso como objetivo determinar la capacidad de moderación neutrónica por el efecto de *standoff* a partir de mediciones en un símil de yacimiento uranífero, estableciendo un factor de corrección por *standoff*, que permitirá una mejor estimación de la humedad del medio, y por tanto, una posterior mejor cuantificación de la ley de uranio en el yacimiento.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se utilizó un símil yacimiento de uranio consistente en cuatro anillos de acero de 632 mm de diámetro interno, 1 mm de espesor y 200 mm de altura como recipiente, rellenos de 300 kg de mineral del yacimiento uranífero de Sierra Pintada, en San Rafael, Mendoza, cuya ley medida es del 0,17 % (Arsen, 2017). Este símil además cuenta con una tubería de acero al carbono de 62 mm de diámetro interno, 5 mm de espesor y 1000 mm de altura ubicado en el centro, para simular la tubería de perforación, por el cual se introduciría la sonda en el campo. Este símil se blindó del fondo ambiente (neutrones productos de radiación cósmica y del suelo por la presencia de ^{238}U), a partir de ladrillos de parafina borada y láminas de cadmio, que son elementos de alta absorción neutrónica (ver Fig. 4).
Para simular el lodo (alto contenido de agua) que se encontraría entre la herramienta de medición y el pozo, se cubrió el interior de la tubería de acero con láminas de polietileno $(C_2H_4)_n$ de baja densidad (PLE) (ver Fig. 3).
Se utilizaron dos detectores con diferentes configuraciones, uno con alto poder de moderación, capaz de detectar neutrones epitérmicos (*Dc*) (de mayor energía que los térmicos) y uno con bajo poder, para detectar los térmicos (*Dd*). Los detectores son del tipo contador proporcional de ^{3}He, ampliamente distribuidos en la industria petrolera, que detectan los neutrones mediante la reacción: ${}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}p + 0{,}764\ MeV$.

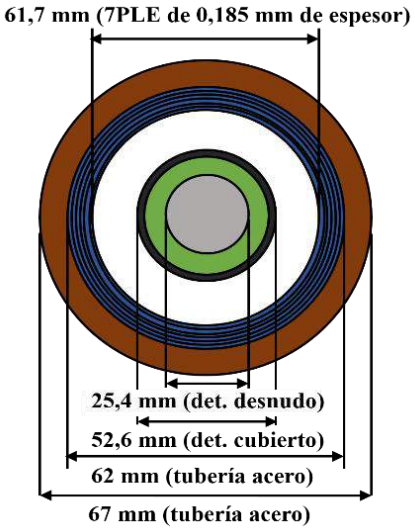


Figura 3. Esquema de vista superior de la tubería de perforación del símil del yacimiento, donde se muestra la relación de dimensiones y posición del detector, las láminas de polietileno de baja densidad y la tubería. Detector desnudo (*Dd*) y detector cubierto (*Dc*).

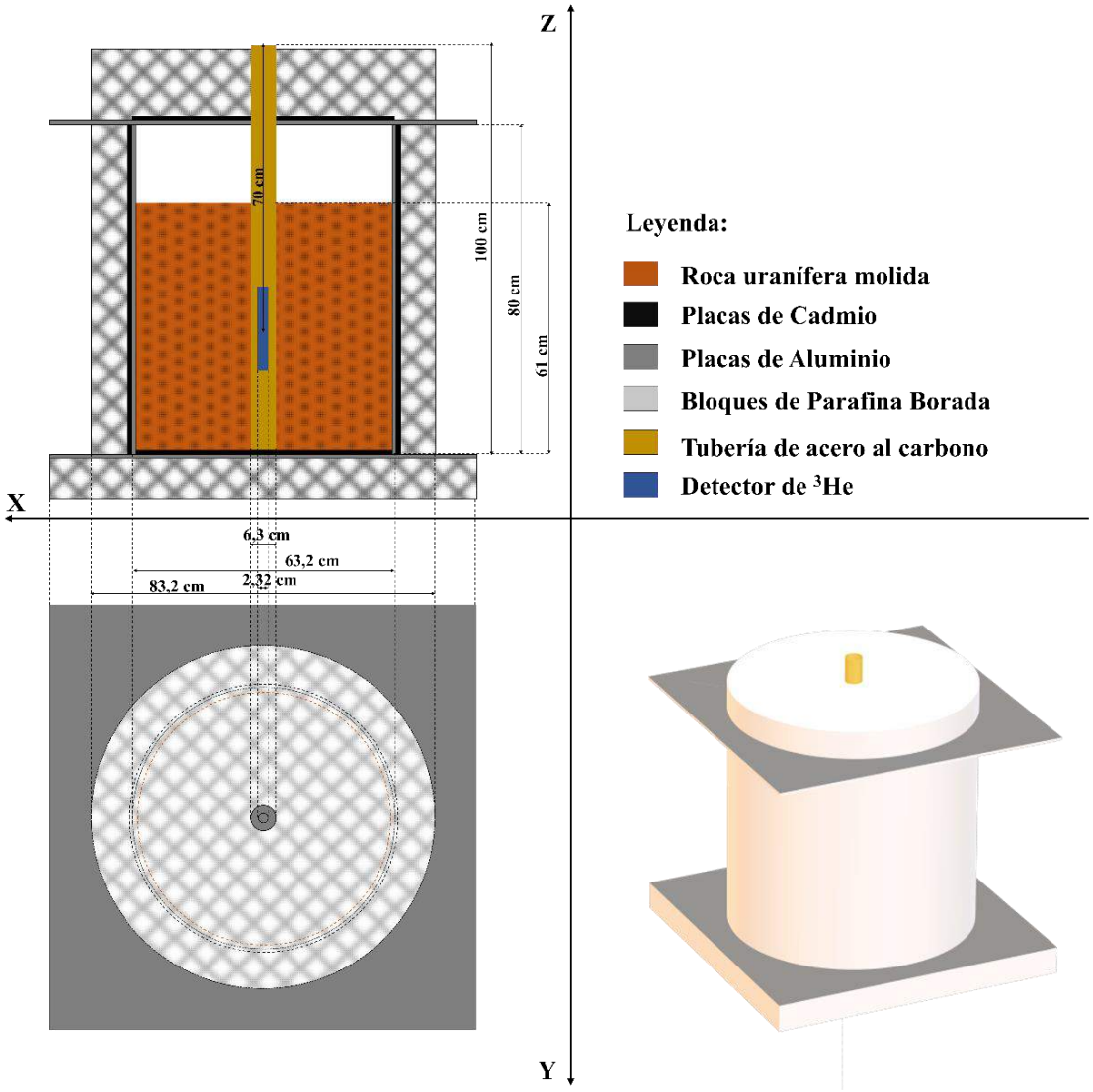


Figura 4. Esquema del símil del yacimiento en laboratorio y posición del detector.

En el trabajo se midió las cuentas de neutrones para el detector en sus dos configuraciones (desnudo y cubierto), agregando 0, 1, 3, 4, 6 y 7 de láminas de PLE (ver Fig. 5). Además, se estimaron experimentalmente, otras variables como la humedad del mineral contenido en este símil del yacimiento, y la densidad de polietileno de las láminas utilizadas para calcular una equivalencia de espesor de lodo o agua entre la superficie de la herramienta y el pozo, es decir, de *standoff*.

Para estimar la humedad del mineral se tomaron dos muestras del mismo a 70 cm de profundidad desde el tope del símil del yacimiento y 10 cm de su centro axial, que se pesaron en su estado original "húmedo" y luego de secarlas en vacío por 48 horas, obteniéndose la humedad como la diferencia de masa entre la muestra húmeda y seca (contenido de agua), respecto a la masa de la muestra seca, dando como resultado una humedad de 3,09 ± 0,74 %. Esta fuente de error se debe a la irregularidad de los recipientes de muestras y la dispersión de mineral durante el proceso de traslado y secado en vacío. Esta humedad indica que el símil del yacimiento se encuentra bastante

seco, y agregarle humedad (agregando láminas de PLE) representaría grandes cambios en el conteo de neutrones (ver Fig. 5).

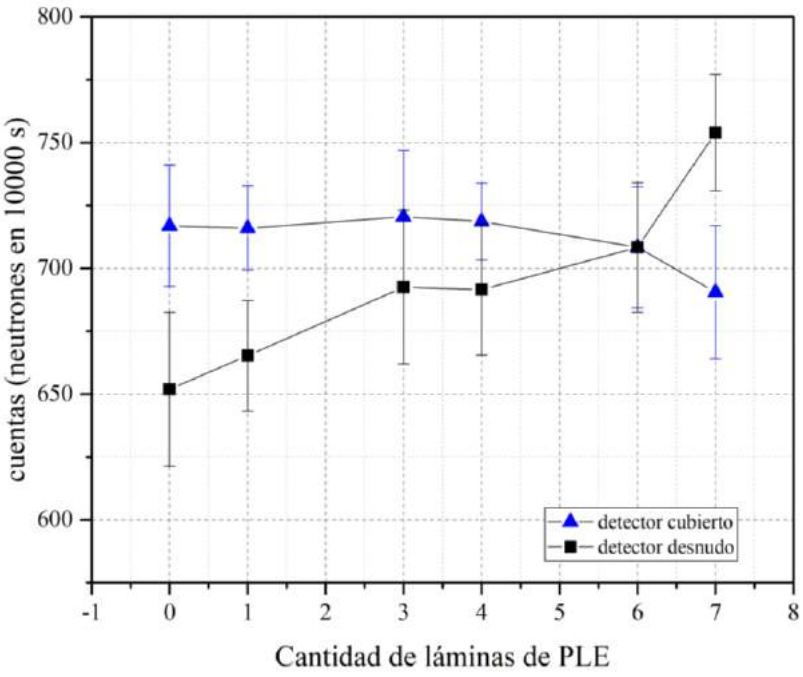


Figura 5. Cuentas del detector desnudo y cubierto (neutrones en 10000 s) según cantidad de láminas de polietileno de baja densidad (PLE).

Como se muestra (ver Fig. 5), el detector desnudo presenta una dependencia prácticamente lineal a medida que aumenta la humedad, partiendo de una mina de baja humedad (3,09 ± 0,74%); mientras que el detector cubierto se comporta de manera constante hasta el punto de medición con 6 PLE, donde se intersecta con las cuentas del desnudo y empieza a decaer. La tendencia lineal de las cuentas del detector desnudo (térmico) se debe a que a medida que se agrega humedad en un medio seco, aumenta su capacidad de moderación, es decir, que los neutrones rápidos de la fisión espontánea de ^{238}U pierden energía y pueden llegar térmicos a la zona activa del detector, para ser contados gracias a su reacción con el ^{3}He de su interior. Por otra parte, el comportamiento constante del detector cubierto (epitérmico) hasta un determinado valor de humedad se comprende, pues este se considera independiente de la humedad del medio (si esta es baja). Ello se debe a que este detector tiene en su configuración, su propio material moderador de neutrones, que permite que los neutrones epitérmicos se moderen y sean captados por el ^{3}He, y cuenta con un absorbedor fuerte de neutrones térmicos, que no permite que estos sean contados. Sus cuentas se mantienen constantes y comienzan a decaer desde el punto de 6 láminas de PLE, pues al aumentar la humedad, aumenta su poder de moderación, con lo que los neutrones llegan con poca energía y no son contados.

Por otro lado la densidad de las láminas de polietileno, se estimó a partir del peso del material en relación con su volumen, dando como resultado 0,935 ± 0,008 g/cm^3, que se corresponde con los polietilenos de baja densidad (entre 0,910 y 0,940 g/cm^3).

Con este valor, se asoció el espesor de lámina de PLE agregado al espesor de lodo entre la herramienta y la pared del pozo, es decir, al equivalente de *standoff*, considerando

que el contenido del lodo es 100 % agua. Si la transmisión de neutrones (ver Ec. 3) se supone igual en ambos medios, se puede estimar el espesor *t* de lodo o *standoff* equivalente conociendo el espesor de lámina de polietileno y las secciones macroscópicas eficaces totales $\sum_T$ (ver Ec. 4) del agua (H_2O) y el polietileno ($(C_2H_4)_n$ o $(CH_2)_{2n}$), que dependen de la sección eficaz microscópica total σ_T (cm^2) a una energía E dada y de la densidad de partículas *N* (cm^{-3}) (ver Ec. 5). Comparando las secciones eficaces microscópicas de los núcleos que componen el agua y el PLE, la del hidrógeno (H) es la única que resulta significativa, y como los compuestos base tiene la misma cantidad de H (H_2O y CH_2), la sección eficaz macroscópica $\sum_T$ dependerá solo de N. Por tanto, sustituyendo los valores (ver Ec.6), se obtuvo que el espesor de lodo (agua) o *standoff* equivalente a una lámina de PLE (0,185 ± 0,001 mm) es de 0,222 ± 0,002 mm. Sería adecuado complementar esta primera aproximación con simulaciones numéricas de la propagación de neutrones en el medio a partir del método Monte Carlo.

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\Sigma_T \cdot t} \tag{3}$$

$$\Sigma_T = N * \sigma(E) \tag{4}$$

$$N = \rho N_A / A \tag{5}$$

Donde ρ (g/cm^3) es la densidad del material, N_A el número de Avogadro ($6{,}023 \cdot 10^{23}$ partículas/mol) y A la masa molar A (g/mol).

$$t(H_2O) = \frac{N(CH_2)\cdot t(CH_2)}{N(H_2O)} = \frac{\rho(CH_2)\cdot t(CH_2)\cdot A(H_2O)}{\rho(H_2O)\cdot A(CH_2)} \tag{6}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presencia de lodo (agua) alrededor de la herramienta de medición o efecto de *standoff*, hace que se sobreestime la humedad de la formación debido a este fenómeno de adición de contenido de hidrógeno al medio, si este no se corrige. Como la humedad del medio depende del cociente de cuentas (ver Ec. 2), se necesita relacionar este con un coeficiente de corrección por *standoff* $k_{t(H2O)}$. Para conocer este coeficiente, se parte de que en 0 mm de espesor de agua agregada (sólo humedad de la formación) este sería igual a 1 (ver Ec. 7) y a medida que aumenta el espesor de agua agregada, este disminuye, pues corrige el cociente medido en el campo (ver Ec. 8), que estaría sobreestimando la humedad del medio (ver Fig. 6). Se debe saber tener en cuenta que para esta corrección se consideró que el lodo es 100 % agua, que sería el peor de los casos por adición de H; sin embargo, en el campo esto puede variar.

$$f_{Dd,Dc}(t(H2O),Dd,Dc) = k_{t(H2O)} = \frac{COCIENTE\,(0mm_H_2O)}{COCIENTE\,(t_H_2O)} \tag{7}$$

$$f_{Dd,Dc}(t(H2O),H,Dd,Dc) = k_{t(H2o)} \cdot f_{Dd,Dc}(H,Dd,Dc) = k_{t(H2o)} \cdot \frac{C(Dd)}{C(Dc)} \tag{8}$$

Como se muestra (ver Fig. 6), se añadió una curva ajustada a la variable del coeficiente de corrección calculado y se obtuvo una primera función polinomial que la caracteriza

$k_{t(H2O)}$ (ver Ec. 9). Sería preciso complementar estos resultados de las mediciones experimentales con los provenientes de la simulación de la distribución neutrónica en el medio por el método de Monte Carlo.

$$f_{Dd,Dc}(t(H2O),Dd,Dc) = k_{t(H2O)} = 1 + 0{,}03586\ t(H2O) + 0{,}02578\ t(H2O)^2 \quad (9)$$

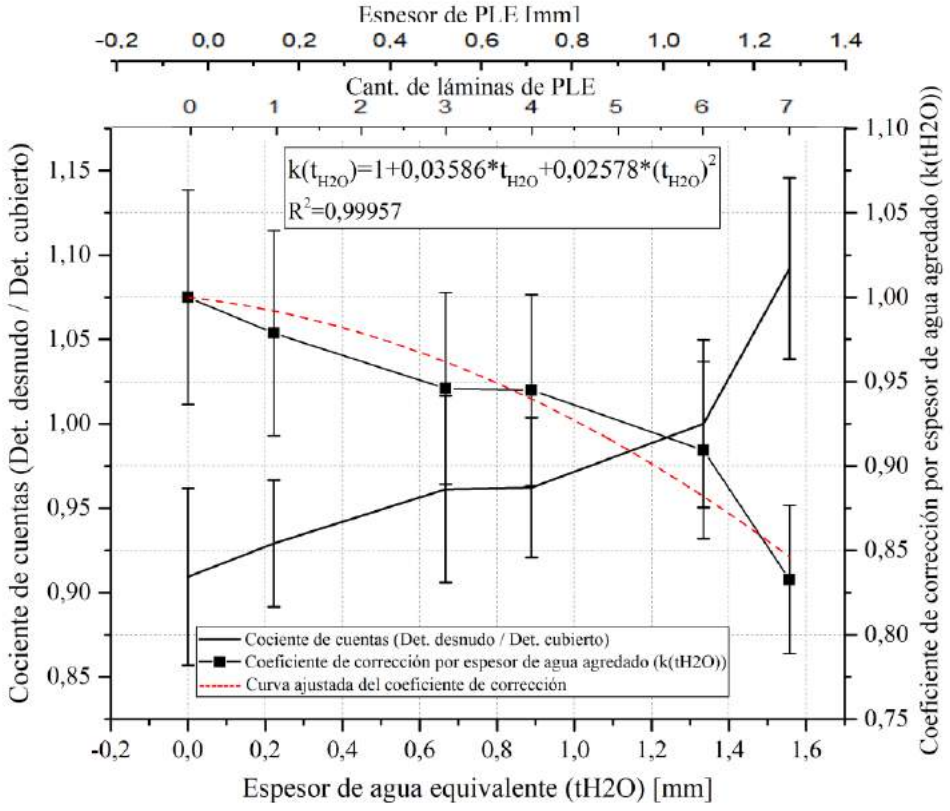


Figura 6. Relación de espesor de agua agregado $t(H_2O)$, con cociente de cuentas (C_{Dd}/C_{Dc}) y coeficiente de corrección por espesor de agua agregado $k_{t(H2O)}$. Se muestra además el ajuste de la curva de este último parámetro y la función que la representa.

Por otra parte, reconociendo el comportamiento de las dos configuraciones de los detectores ante la humedad del medio, se puede proponer algunas recomendaciones para la utilización de la técnica para la cuantificación directa de la ley de uranio. Debido a que la humedad del medio, normalmente es superior al valor medido (3,09 ± 0,74 %), se sugiere que para el cálculo de la ley de uranio (ver Ec. 1), una vez conocida la humedad a partir del cociente de cuentas corregido (ver Ec. 10), se confíe más en el detector térmico, pues su alcance es mayor que el del epitérmico y su contaje estaría grandemente favorecido con el aumento del contenido de hidrógeno, hasta un máximo donde empezaría a ocurrir la disminución de cuentas como en el detector epitérmico pues el aumentaría la probabilidad de absorción de neutrones en el medio. Además, esto se corrobora con los resultados de simulación de Arsen (2017), donde se muestra que el alcance del detector epitérmico disminuye más rápido que el del térmico, con el aumento de la humedad.

Dados los resultados expuestos, y contando con que se sigue un procedimiento parecido al realizado en este trabajo, pero en mayor detalle, en una central de calibración, se sugiere seguir con la siguiente metodología en la aplicación del método neutrónico pasivo propuesto en la exploración de un yacimiento uranífero:

1. Perforar un pozo de exploración en el yacimiento uranífero prospectado a partir de la integración de métodos geofísicos, geólogos y geoquímicos de superficie.
2. Emplear métodos geofísicos convencionales de pozos como el gamma total natural y el de resistividad; para identificar los intervalos geológicos de interés.
3. Registrar mediciones con dos detectores, uno desnudo (térmico) y otro cubierto (epitérmico) colocados en la sonda neutrónica prototipo. El intervalo de muestreo en tiempo se supone práctico de 2 horas y el muestreo espacial según intervalos geológicos de interés.
4. Realizar las mediciones de diámetro de pozo a partir de la herramienta *caliper*.
5. Calcular el espesor de lodo de perforación ubicado entre la pared del pozo y la herramienta de medición (*standoff*).
6. Analizar el contenido del lodo, para adecuar la función del coeficiente de corrección por *standoff* según los resultados, complementándose con pruebas en la central de calibración. En este trabajó se consideró que este es 100 % agua.
7. Corregir el cociente de cuentas por este espesor.
8. Asociar el cociente de cuentas corregido a una humedad de la formación (o porosidad neutrónica).
9. Una vez conocida la función $fi(H, Di)$ (ver Ec. 1) (por simulaciones en trabajos futuros), calcular la ley de uranio contenido en la formación de interés.
10. Integrar la información de todos los registros de pozos y geoquímicos para localizar la formación geológica donde se encuentra el mineral de uranio, conocer su profundidad y espesor.
11. Continuar con el cateo de otros pozos alrededor.
12. Correlacionar los resultados y calcular las reservas estimadas del yacimiento uranífero.

CONCLUSIONES

La sonda neutrónica propuesta permite determinar simultáneamente la humedad de la formación y la ley de uranio, y su localización. Su principal desventaja es la baja intensidad de la fuente, que es la fisión espontánea del ^{238}U (13,6 $n \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$); pero a su vez es lo que lo caracteriza como método directo.

Se estableció una función que relaciona un factor de corrección según espesor de lodo de perforación en la pared del pozo ($f_{Dd,Dc}(t(H2O), Dd, Dc) = k_{t(H2O)}$). De esta manera, el cociente de cuentas queda corregido por este efecto y se puede estimar mejor la humedad de la formación, y por tanto, obtener una ley de uranio con mayor precisión. Además, se propuso una metodología para la utilización de este método en campo.

Las cuentas del detector presentan un comportamiento diferente según su configuración, a medida que se agrega humedad al medio. El detector desnudo o térmico aumenta sus cuentas de manera aproximadamente lineal con la humedad y el detector cubierto o epitérmico, presenta un comportamiento constante hasta el punto correspondiente a 6PLE (1,35 ± 0,05 mm de H_2O o *standoff*), donde comienza a decaer.

En el aspecto experimental, se recomienda aumentar la cantidad de láminas de polietileno agregadas para conocer el efecto de este factor de corrección para espesores mayores que 1,56 mm, ya que esta distancia (*standoff*) en el campo puede ser de 0 a 254

mm (10 in); así como medir con mayor precisión la humedad de las muestras usando otros métodos.

Correlacionar los resultados experimentales obtenidos con simulaciones de la distribución y propagación de los neutrones en el medio, a partir de métodos numéricos deterministas o estocásticos como el de Monte Carlo; sobre todo en lo que respecta al comportamiento de las cuentas de cada detector según la humedad del medio distribuida uniformemente ($fi(H, Di)$), para luego conocer con más certeza la ley de uranio.

Conocer el comportamiento de de las mediciones variando la ley de uranio en una central de calibración para conocer la función $Ci = (ki * U) * t * fi(H, Di)$, donde se podrá investigar la sensibilidad del método (mínima variación de ley de uranio que se detecta) y el mínimo intervalo de tiempo de medición para una interpretación fiable.

Se sugiere realizar experimentos y simulaciones del comportamiento de las mediciones por efecto de otros factores, como la temperatura, ya que ello modificaría las energías de termalización y las velocidades neutrónicas, y con ello la medición.

REFERENCIAS

Arsen, A. Diseño conceptual de una sonda neutrónica para determinación de mineralización uranífera. Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear. Instituto Balseiro, Universidad Nacional Cuyo (2017).

Baker, H. Openhole well logs - Log Interpretation Basics. *Practical Reservoir Enginnering and Characterization* (2015).

Barbarán, G. A. Análisis de requerimientos de inversiones e infraestructura. Sector Nuclear Argentino. *Cámara Argentina de la Construcción*, 1-84 (2015).

Bennun, L., Mayer, R., Korochinsky, S. & Gillette, V. Uranium assay in mineral samples by means of neutron detection of uranium-238 spontaneous fission. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B* (267), 525-534 (2009).

Broding, R. A. & Rummerfield, B. F. Simultaneous Gamma Ray and Resistance Logging as applied to Uranium Exploration. *Geophysics, XX* (4), 841-859 (1955).

Ellis, D. V. & Singer, J. M. *Well Logging for Earth Science*, Springer (2008).

Hansen, M. V. Recursos mundiales de uranio. *I.A.E.A. Bulletin, 23* (2), 10-14 (1981).

I.A.E.A. Practical Borehole Logging Procedures for Mnieral Exploration, with Emphasis on Uranium. 259, 1-60 (International Atomic Energy Agency, 1986).

I.A.E.A. & I.N.F.C.I.S. World Distribution of Uranium Deposits (2019).

I.A.E.A. & N.E.A. Uranium 2018: Resources, Production and Demand. A Joint Report by N.E.A. and I.A.E.A. (REDBOOK), 1-462 (2018).

Korochinsky, S. *Estudio de factibilidad de sondas para prospección uranífera. Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear. Instituto Balseiro, Universidad Nacional Cuyo* (1995).

Reilly, D., Ensslin, N. & Smith, H. J. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1991).

COMPARACIÓN DE LAS TASAS DE EMISIÓN DE SO_2 EN PLUMAS VOLCÁNICAS DE LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA (NORTE DE CHILE) MEDIANTE EL USO DE ESPECTRÓMETRO ÓPTICO (DOAS) Y CÁMARA UV (PiCam)

González C.[ab], Layana S.[abe], Wilkes T.[c] y Aguilera F.[ade]

[a] *Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[b] *Programa de Doctorado en Ciencias mención Geología, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[c] *Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield, UK*
[d] *Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[e] *Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres (CIGIDEN), CHILE*

e-mail: cristobal.gonzalez@alumnos.ucn.cl

RESUMEN

El SO_2 es un gas de origen magmático que está presente en plumas emitidas desde sistemas volcánicos. El monitoreo de estas plumas permite determinar el comportamiento base para cada sistema, con lo cual es posible estimar el flujo de gas emitido a la atmósfera de distintas especies (e.g. H_2O, CO_2, SO_2, halógenos) y detectar cambios en el comportamiento de estos. En la Zona Volcánica Central (ZVC) del norte de Chile, existen decenas de volcanes activos con desgasificación pasiva, donde la mayoría se encuentra en la Región de Antofagasta, de los cuales, solo dos son monitoreados periódicamente mediante técnicas remotas de gases en superficie (volcanes Isluga y Láscar). El objetivo de este trabajo es determinar las tasas de emisión de SO_2 en los sistemas volcánicos de la Región de Antofagasta, además de comparar técnicas de medición en sistemas con bajas y moderadas tasas de emisión. Durante 2019, se realizaron campañas en los volcanes Olca y Ollagüe localizados en la frontera con Bolivia (Departamento de Potosí) y el volcán Lastarria en la frontera con Argentina (provincias de Salta y Catamarca). Se utilizó un espectrómetro de absorción óptica diferencial (DOAS) y una cámara ultravioleta de bajo costo (PiCam). A pesar de utilizar distintas técnicas, ambos instrumentos permiten determinar el flujo SO_2 emitido a la atmósfera, a través de la capacidad de este gas de absorber porciones del espectro ultravioleta de la luz. De acuerdo con trabajos previos, estos sistemas volcánicos pueden ser clasificados en, i) sistemas con bajas tasas de emisión (< 20 ton/día), relacionado a volcanes con acotados campos fumarólicos de baja temperatura, con fluidos enriquecidos en componentes hidrotermales, i.e. volcanes Olca y Ollagüe; y ii) sistemas con moderadas tasas de emisión (>20 ton/día), asociados a campos fumarólicos de alta temperatura y fluidos enriquecidos en componentes magmáticos i.e. volcán Lastarria.

Palabras Clave: SO_2, DOAS, Cámara UV PiCam, Zona Volcánica Central

INTRODUCCIÓN

En monitoreo de la actividad volcánica nos permite entender su comportamiento y los cambios que pueden producir el ascenso del magma a través del volcán (e.g. Sparks,

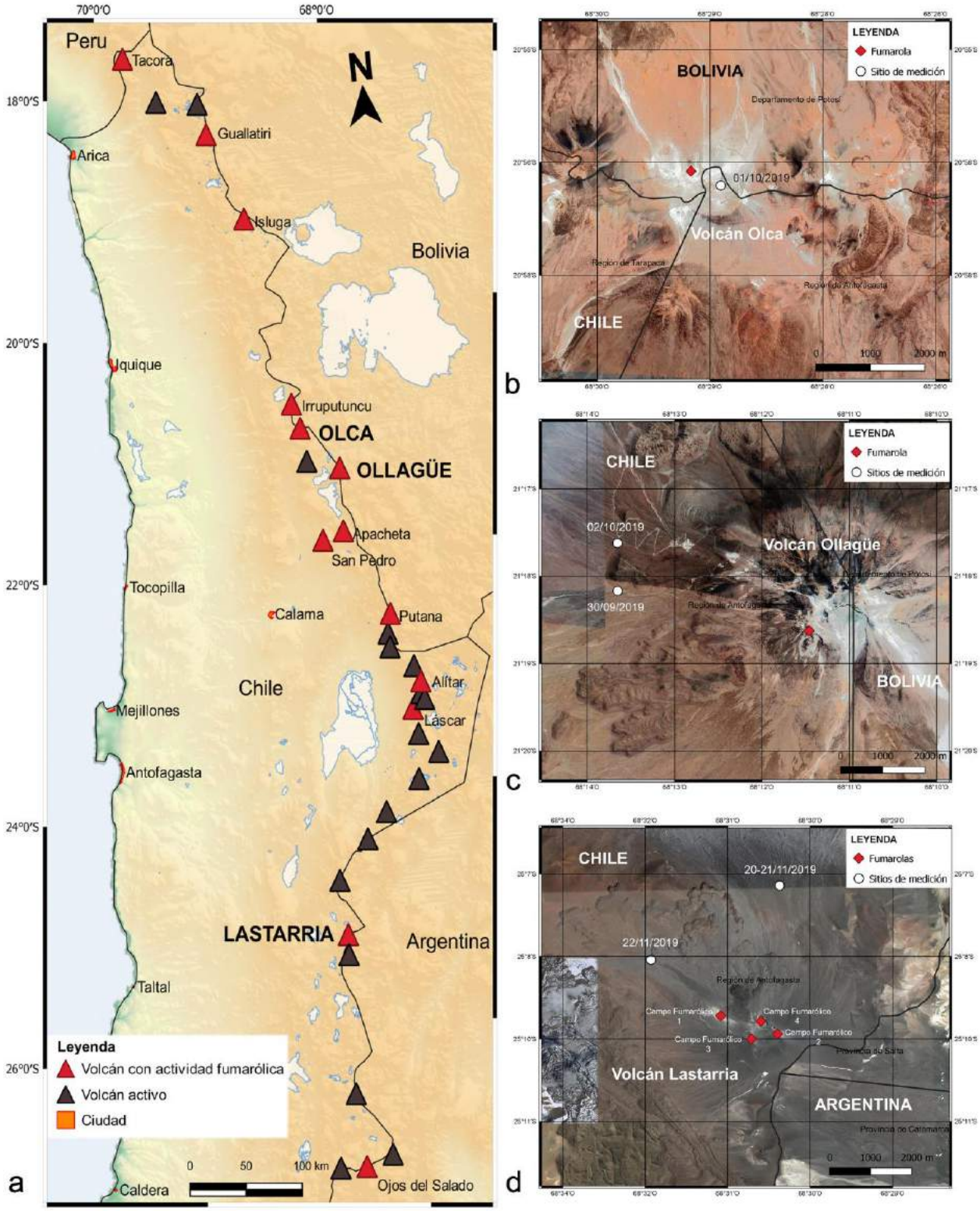
2003). Para el monitoreo de gases volcánicos se realizan diferentes técnicas, como el muestreo directo de gases (e.g. Giggenbach, 1996; Vaselli et al, 2006), técnicas remotas de monitoreo de gases mediante satélites (e.g. Carn et al, 2017) y técnicas remotas de monitoreo de gases en superficie (e.g. Galle et al. 2010). El monitoreo de gases en plumas volcánicas nos permite detectar señales precursoras de ascenso magmático, ya sea por cambios en su composición químicas o por variaciones en los flujos de gases emitido en superficie. Estos gases pueden ser liberados de dos formas: i) emisiones de grandes volúmenes de gases, en erupciones volcánicas de gran escala; ii) desgasificación pasiva y persistente de volcanes con actividad eruptiva baja a moderada (Aiuppa, 2015). Las plumas volcánicas están constituidas por una mezcla de especies de origen magmático (H_2O, CO_2, SO_2, HCl, HF), gases nobles y elementos trazas (e.g. Sawyer et al, 2008). Entre estas especies, el dióxido de azufre (SO_2) es tercero en abundancia y sus variaciones en las tasas de emisión, es un indicador de perturbaciones a profundidades someras del sistema (e.g. Galle es al, 2002; Sparks et al, 2012). Además, esta especie puede ser fácilmente detectado por técnicas remotas de monitoreo de gases a través de mediciones en superficie y por satélites (Oppenheimer et al, 2011; Carn et al, 2016, 2017).

En la Zona volcánica Central (ZVC) del norte de Chile existen alrededor de 13 volcanes activos y potencialmente activos con desgasificación pasiva permanente. Ocho de estos se encuentran en la Región de Antofagasta (Chile) y varios están en la frontera con Bolivia y Argentina (ver Figura 1a). En la ZVC, la actividad volcánica histórica ha sido reportada desde el siglo XIX (e.g, Casertano, 1963), con registros de intensa actividad fumarólica sin actividad eruptiva, ocasionales erupciones freáticas y freatomagmáticas con índice de explosividad volcánica 2 (IEV) y una erupción sub-pliniana IEV 4 (19-20 abril 1993, volcán Lascar; e.g. GVP, 1993). También, esporádica actividad vulcaniana de IEV 2-3 (volcán Lascar; e.g. GVP, 1995, 2005).

En los últimos 30 años, se han realizado mediciones de gases en los volcanes en el norte de Chile (e.g. Andres et al, 1991). De los cuales, los volcanes Láscar e Isluga son monitoreados periódicamente mediante técnicas remotas de monitoreo de gases en superficie (DOAS; OVDAS-SERNAGEOMIN y NOVAC, respectivamente). Sin embargo, otros sistemas con desgasificación pasiva permanente y escasa actividad eruptiva son ocasionalmente monitoreados. En la región de Antofagasta se han realizado mediciones discretas en las plumas de los volcanes Olca (Aguilera et al, 2020), Ollagüe (Clavero et al, 2006; OVDAS-SERNAGEOMIN, 2014; Tamburello et al, 2014; Aguilera et al, 2020), San Pedro (OVDAS-SERNAGEOMIN, 2014; Tamburello et al, 2014; Aguilera et al, 2020), Putana (Tamburello et al, 2014; Stebel et al, 2015; Aguilera et al, 2020) y Lastarria (Tamburello et al, 2014; Carn et al, 2017; López et al, 2018). El objetivo principal de este trabajo es determinar las tasas de emisión de SO_2 en sistemas volcánicos de la Región de Antofagasta. Además, como objetivo específico comparar técnicas de medición gases en superficie. Esto a través de un espectrómetro de absorción óptica diferencial (DOAS) y Cámara UV de bajo costo (PiCam; Wilkes et al, 2016, 2017).

CASOS DE ESTUDIO

Tres volcanes de la ZVC del norte de Chile fueron estudiados en dos campañas de terreno realizada en 2019, y sus resultados fueron comparados con trabajos anteriores. Los sistemas corresponden a los volcanes Olca, Ollagüe y Lastarria, estos presentan



desgasificación pasiva persistente y la presencia casi permanente de pluma volcánica, sin registro de actividad eruptiva histórica (ver Figura 1a).

Figura 1. a. Mapa de ubicación del arco volcánico activo de la Zona Volcánica Central del norte de Chile. **b.** Volcán Olca, ubicación campo fumarólico y sitio de medición. **c.** Volcán

Ollagüe, ubicación campo fumarólico y sitios de medición. **d.** Volcán Lastarria, sitio de medición y distribución de los campos fumarólicos.

Volcán Olca (20°57'S; 68°30'W; 5450 m s.n.m.) es parte del Complejo volcánico Olca-Paruma de 20 km de longitud con orientación este-oeste (de Silva and Francis, 1991). Está ubicado en la frontera de la Región de Antofagasta con el Departamento de Potosí, Bolivia. Está constituido por una serie estratovolcanes solapados, con flujos de lava, domos de lava y flujos piroclásticos de composición andesita a dacita, de edades Pleistoceno Superior a Holoceno (González-Ferrán, 1995; Wörner et al, 2000; Gardeweg et al, 2009; Martínez et al, 2017). De acuerdo con Aguilera (2010). En su cima presenta actividad fumarólica persistente, relacionada a la formación de un domo de lava, el cual surgió en su último episodio eruptivo. Tassi et al, (2011) indican que la fumarola presenta temperaturas entre los 84°C a 91°C y sus fluidos están dominados por componentes hidrotermales. A menudo, se observa una discreta y única pluma que asciende hasta ~50 m sobre el domo (Aguilera et al, 2020).

Volcán Ollagüe (21°18'S; 68°11'W; 5868 m s.n.m.) corresponde a un estratocono compuesto ubicado a 12 km al sureste del poblado de Ollagüe y es fronterizo con el Departamento de Potosí, Bolivia. Presenta una historia evolutiva en múltiples etapas, con domos riodacíticos, flujos de lava y domos de composición andesita silícea a dacita, flujos y oleadas piroclásticas, depósitos de flujos de bloques y cenizas, y depósitos de avalancha de edades < 1,2 Ma (Stern et al, 2007). En el flanco suroeste de la cima, hay emisiones fumarólicas permanentes con temperaturas entre los 107°C a 111°C (Tamburello et al, 2014), las cuales están relacionadas a un flujo o domo de lava (Stern et al, 2007). Generalmente se observa una única pluma volcánica que alcanza los 300-600 m sobre la cima (Aguilera, et al. 2020).

Volcán Lastarria (21°09'S; 68°31'W; 5697 m s.n.m.) es parte del Complejo Volcánico Lastarria-Cordón del Azufre (Lazufre) ubicado a 250 km al SW de la ciudad de Antofagasta, en la frontera con las provincias de Salta y Catamarca, Argentina. Está compuesto por tres estructuras diferentes (Naranjo, 1992, 2010) correspondientes a: i) campo de lavas Negrillares, ii) Espolón Sur y ii) Lastarria *sensu stricto*, estructura conocida como volcán Lastarria. Lastarria es un estratocono compuesto, con cinco cráteres semianidados con orientación norte-sur. Está conformado por una sucesión de flujos de lava y domos andesíticos, flujos piroclásticos andesíticos y depósitos de avalancha, con edades entre los 260 ± 20 ka a < 2,5 ka (Naranjo, 2010). Presenta cuatro campos fumarólicos activos y extensos depósitos fumarólicos asociados. Tres de ellos están distribuidos en la cima y uno el flanco noroeste del volcán (Aguilera, 2010). Las fumarolas alcanzan temperaturas entre los 80 °C hasta los 408 °C y los fluidos son una mezcla de componentes magmático e hidrotermales (Aguilera et al, 2012; López et al, 2018). Generalmente, la pluma volcánica puede alcanzar los 1000 m sobre la cima.

MONITOREO REMOTO DE SO_2 EN SUPERFICIE

Durante el 2019 se realizaron dos campañas de terreno, la primera a los volcanes Ollagüe (30 de septiembre y 2 de octubre) y Olca (1 de octubre) (ver Figuras 1b y 1c). La segunda al volcán Lastarria (21-22 de noviembre) (ver Figura1d). En los volcanes Olca y Ollagüe se realizaron mediciones mediante equipo DOAS. En el volcán Lastarria de emplearon dos técnicas de monitoreo remoto en superficie para medir las concentraciones de SO_2 (ppm·m) en las plumas volcánicas. Con lo cual se calcularon las tasas de emisión de SO_2 en ton/día para cada sistema.

 ISBN 978-987-1323-66-1

Condiciones Meteorológicas

Las campañas de terreno fueron realizadas en la estación seca de los Andes Centrales (Garreaud, 1999). Las mediciones fueron realizadas en condiciones climáticas óptimas, con cielo limpio, escasa nubosidad y sin registro de grandes precipitaciones en las semanas previas. Las condiciones atmosféricas para cada volcán fueron consultadas en la base de datos reanalizados de ERA5-Land del ECMWF (Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio; Hersbach et al, 2020), el cual cuenta con una resolución espacial de ~9 km. También, se revisaros los datos de la estación meteorológica en línea de la localidad de Ollagüe, perteneciente a la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, Chile). De la cual se consultaron las velocidades del viento y de las ráfagas a 2 m sobre la superficie, para los días de medición en el volcán Ollagüe (https://agrometeorologia.cl). Además, se realizaron mediciones con un anemómetro portátil en la cima del volcán Olca y en la base de los volcanes Ollagüe y Lastarria.

Tabla I. Condiciones meteorológicas obtenida de la base de datos ERA5-Land del ECMWF (1), datos de la INIA, Chile (2) y mediciones con anemómetro portátil (3).

Volcán	Ubicación Lat.; Long.	Fecha	Hora local (UTC-3)	Presión Atmos.[1] (mbar)	Velocidad del viento a 10 metros [1]	Velocidad del viento
Olca	20,96°S; 68,50°O	01/10/2019	11 – 14	606	2,9 – 5,2 m/s	2,5 - 5,7 m/s (3)
Ollagüe	21,31°S; 68,18°O	30/09/2019	11– 15	624	0,6 – 3,3 m/s	1,5 - 6,1m/s (2)
		02/10/2019	11 – 14	623	1,0 – 3,9 m/s	0,9 - 13,1 m/s (2)
Lastarria	25,18°S; 68,50°O	20/11/2019	09 – 15	587	0,5 – 4,9 m/s	3 - 11 m/s (3)
		21/11/2019	11 – 13	587	3,4 – 3,9 m/s	6,7 – 14,9 m/s (3)
		22/11/2019	10 – 15	587	1,9 – 4,7 m/s	2 – 5 m/s (3)

DOAS estacionario

El DOAS emplea el método de Absorción Óptica Diferencial (*Differenctial Optical Absorption Spectroscopy*). El cual determina las columnas de densidad de un gas, a través de las mediciones de la estructura de las bandas de absorción en el espectro ultravioleta y visible de la luz (e.g. Rodriguez and Nadeau, 2015). El equipo capta la luz del sol que atraviesa la pluma y la dirige por espejos hacia un lente al interior del equipo. El lente enfoca la luz a través de una fibra óptica hacia un espectrómetro *Ocean Insight* USB2000+. Tanto los espejos como el lente, están montados en un cabezal externo, el cual cuenta con un motor de pasos que permite el barrido de la pluma volcánica. Los datos son transmitidos a un computador portátil, el cual controla los parámetros de medición y registra los datos. De acuerdo con Wilkes et al. (2017, 2019), los espectros obtenidos, son corregidos del ruido instrumental (espectro oscuro) y normalizados con respecto el espectro del cielo azul, ambos adquiridos previos a cada medición. Posteriormente, estos son corregidos de la dispersión y filtrados de las interferencias provocadas por la estructura espectral solar. Tras lo cual, son ajustados a un espectro de absorción referencial de SO_2 y O_3, mediante el método de mínimos cuadrados. Una vez procesados, las columnas de densidad de SO_2 son integradas en una sección bidimensional de la pluma. Los valores obtenidos son multiplicados por la velocidad del viento para obtener las tasas de emisión de SO_2.

Cámara UV de bajo costo (PiCam)

La PiCam es una cámara UV para la medición de SO_2 de bajo costo, desarrolla por Wilkes et al, (2016). El instrumento está basado en dos módulos de cámara Raspberry Pi v1 modificados por Wilkes et al, (2016), con el fin de incrementar la respuesta de los sensores a la radiación ultravioleta. Asimismo, cada lente presenta un filtro óptico de pase de banda con transmisión máxima en las longitudes de onda de 310 nm y 330 nm, respectivamente. Estas longitudes de onda corresponden a las regiones de absorción y no absorción del SO_2 en el espectro de luz ultravioleta, respectivamente (e.g. Mori and Burton, 2006). Las cámaras están conectadas a computadores Rapsberry Pi 3Model B y ambas transmiten los datos de forma inalámbrica a un computador portátil. El cual controla la captura de imágenes. Las imágenes se procesan mediante la comparación de los canales 310 nm y 330 nm, aislando la absorción del SO_2. Posteriormente, estás imágenes son corregidas mediante celdas de calibración (e.g. Mori and Burton, 2006), las cuales contienen columnas de densidades de SO_2 de 100, 467 y 1989 ppm·m, cada una con un error de ±10% (Aguilera et al., 2020).

RESULTADOS

El 1 de octubre de 2019, se instaló el equipo DOAS a 600 m al SE de pluma del volcán Olca. Se realizaron 71 escaneos entre las 11:46 y 13:19 hora local (UTC-3). Las velocidades de viento medidas en terreno varían en 1,2% con respecto a las obtenidas del modelo atmosférico. Por lo cual se procesaron los datos con las velocidades obtenidas en terreno. El DOAS estacionario registró una tasa de emisión de SO_2 promedio de 8,5 ± 3,3 ton/día, con un valor máximo de 14,2 ton/día (ver Figura 3a).
El 30 de septiembre el DOAS se instaló a 5000 m al WNW de la pluma del volcán Ollagüe. Se realizaron 209 escaneos entre las 10:57 y 14:31 hrs (UTC-3). El DOAS estacionario obtuvo tasa de emisión de SO_2 de 49,6 ± 25,4 ton/día y un valor máximo de 115 ton/día. Posteriormente, el 2 de octubre, se instaló el equipo a 4700 m al NW de la pluma del volcán Ollagüe. Se realizaron 133 escaneos entre las 11:10 y 13:44 hrs (UTC-3). Se estimaron tasas de emisión de SO_2 promedio de 117,1 ± 64,7 ton/día y un valor máximo de 252 ton/día. Las velocidades del viento utilizadas para procesar los datos del DOAS, fueron obtenidos de la estación meteorológica del INIA (Chile). Se observa que el 2 de octubre, la velocidad del viento se triplican pasado el mediodía. El DOAS estacionario registra de tasa de emisión de SO_2 para los dos días de 75,8 ± 45,0 ton/día (ver Figura 3b).
El 21 de noviembre de 2019, se realizó mediciones a 4000 m al N de los campos fumarólicos 2, 3 y 4, ubicados en la cima del volcán Lastarria. Se realizaron 15 escaneos con el equipo DOAS entre las 11:30 y 12:01 hrs (UTC-3) y se capturaron 891 imágenes con la cámara UV PiCam entre las 13:15 y 17:30 (UTC-3). El DOAS registró tasas de emisión de SO_2 entre 1416 ± 568 ton/día y un valor máximo de 2.456 ton/día. PiCam registró tasas de emisión promedio de 496,4 ± 123,0 ton/día y velocidades de la pluma promedio de 13,4 m/s. El 22 de noviembre, los instrumentos fueron instalados a 3100 m al NW de los campos fumarólicos 1, 3 y 4. Se realizaron 98 escaneos con DOAS entre las 10:33 y 14:25 (UTC-3) y se capturaron 199 imágenes con PiCam entre las 11:30 y 11:47 hrs (UTC-3). DOAS registró 466,9 ± 235,1 ton/día y un máximo de 1234 ton/día. La cámara UV indicó tasas de emisión promedio de 156,8 ± 41,6 ton/día y velocidades de la pluma promedio de 4.9 m/s (ver Figura 3c y 3d). Las tasas de emisión de SO_2 promedio del volcán Lastarria con el equipo DOAS fue de 604,3 ± 302,6 ton/día y

cámara UV PiCam de 434,4 ± 112,6 ton/día, con un promedio total de ambas técnicas de 450,3 ± 141,5 ton/día.

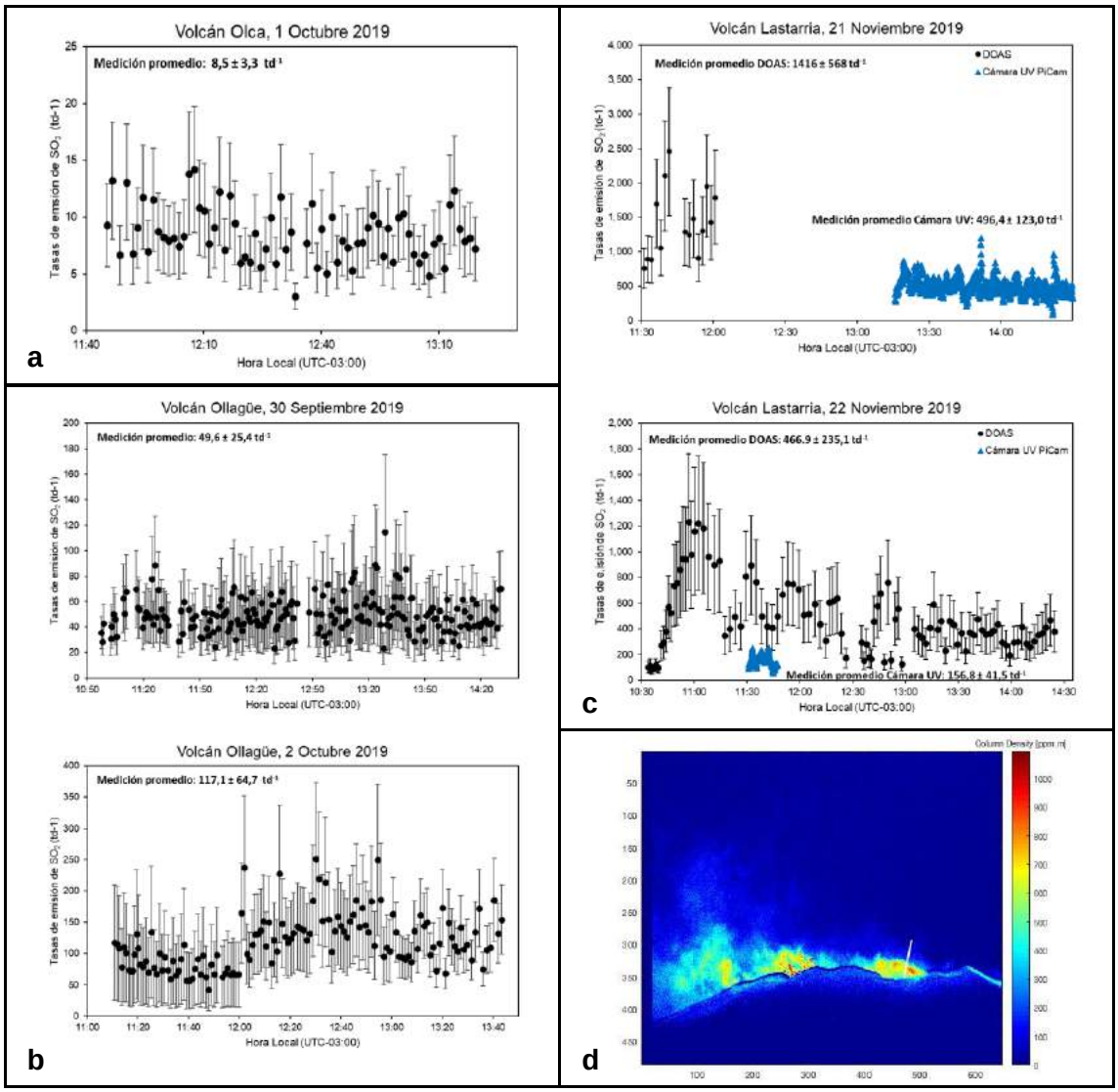


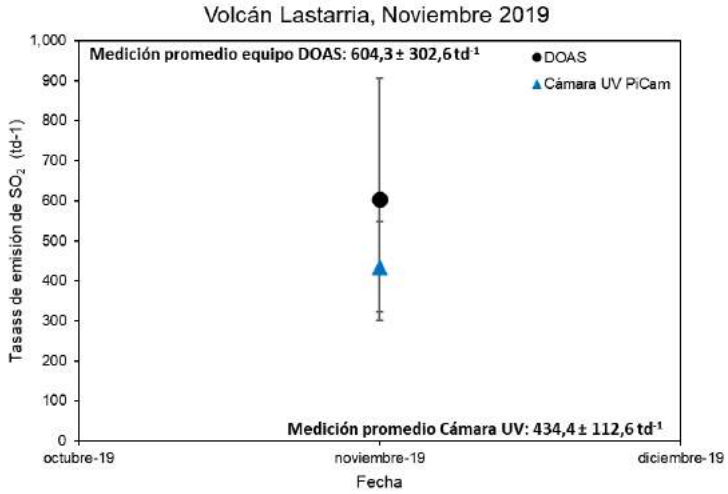
Figura 3. a. Tasas de emisión mediante DOAS estacionario en volcán Olca, 01/10/2019. **b.** Tasas de emisión mediante DOAS estacionario volcán Ollagüe, 30/09/2019 y 02/10/2019. **c.** Tasas de emisión mediante DOAS estacionario y cámara UV PiCam en Volcán Lastarria, 21-22/11/2019. **d.** Imagen procesada de cámara UV PiCam en volcán Lastarria, 21/11/2019. La escala de colores indica concentración de la columna de densidad de SO_2 (ppm·m) de las plumas de los campos fumarólicos 2, 3 y 4 del flanco norte.

DISCUSIONES

Comparación entre técnicas de medición de SO_2 en superficie

En caso del volcán Lastarria, ambos instrumentos permitieron determinar la cantidad de SO_2 emitido a la atmósfera, a través de la capacidad de este gas de absorber porciones del espectro electromagnético de la luz en longitudes de onda ultravioleta (e.g. Rodríguez and Nadeau, 2015; McGonigle et al, 2017). A pesar de que no se pudo obtener extensas mediciones en paralelo (e.g. problemas en la transmisión de datos en terreno, configuración del GPS, capacidad de las baterías de los equipos), las tasas de

emisión de SO_2 promedio para los días 21 y 22 de noviembre de 2019, obtenidos mediante cámara UV se ajusta a una desviación estándar de los valores promedios



obtenidos por el equipo DOAS (ver Figura 4).

Figura 4. Tasas de emisión de SO_2 promedio mediante DOAS estacionario y cámara UV PiCam en volcán Lastarria.

Principalmente, las mayores fuentes de incertidumbre y error en ambas técnicas pueden provenir de la dilución de la luz y la estimación de la velocidad de la pluma (e.g. Ilanko et al, 2019). La dilución de la luz afecta las mediciones realizadas con cámara UV, ya que depende de la distancia y la ortogonalidad del equipo de medición con respecto a la pluma, además de las condiciones atmosféricas presentes (e.g. nubosidad). Para estimar la dilución de la luz, es necesario realizar mediciones en paralelo con equipo situados a diferentes distancias de la pluma, con lo cual se requieren de dos cámaras UV operen continuamente (e.g. Kern et al, 2013). En cambio, las variaciones de las velocidades de viento son más difíciles de estimar, debido a la ausencia de estaciones meteorológicas cercanas al arco volcánico, lo cual genera modelos atmosféricos de baja resolución (Aguilera et al, 2020). En nuestro caso, se observa que las velocidades de viento obtenidas de los modelos atmosférico en Ollagüe y Lastarria puede llegar a subestimar velocidades de emisión de la pluma hasta en un tercio de lo registrado en terreno. Generando una mayor incertidumbre en las mediciones realizadas con el equipo DOAS. En el caso del volcán Olca, las mediciones realizadas cercanas al centro de emisión permitieron acotar rango de error de las mediciones con equipo DOAS a un 39%. En el volcán Ollagüe, los datos de la estación meteorológica ubicada en el poblado cercano redujeron la incertidumbre entre un 49% a 56%. En el volcán Lastarria, la cámara UV nos permitió determinar la velocidad de la pluma a partir del procesamiento por correlación cruzada de las imágenes (e.g. Mori and Burton, 2006). Debido a la alta resolución temporal del equipo PiCam, el cual puede capturar entre 12 a 15 imágenes por minuto, nos permitió reducir la incertidumbre en los datos del equipo DOAS a 38% - 43%.

Comparación con mediciones previas

En la Tabla II, se resumen las mediciones realizada y publicadas en los volcanes en estudio. Las primeras mediciones realizadas en el volcán Olca fueron mediante una cámara UV PiCam en marzo de 2018 por Aguilera et al. (2020). Con respecto a nuestros

datos, se observa una leve disminución en las tasas de emisión de SO_2 con respecto a 2018, pero se ajustan en el rango de una desviación estándar. En el caso del volcán Ollagüe, a partir de 2004 han realizado mediciones discretas con equipo DOAS y en 2018 mediciones con Cámara UV (PiCam). Se observa que los datos obtenidos en las primeras mediciones presentan una gran desviación estándar, según Aguilera et al, (2020), esto puede ser atribuido a variaciones en la estimación de la velocidad de la pluma y/o geometría de la pluma. Al comparar nuestras mediciones con las realizadas mediante PiCam en 2018, las variaciones observadas podrían estar asociadas a cambios estacionales, problemas en la estimación de la velocidad del viento y a algún fenómeno estacional que pueda afectar la medición de los instrumentos. Los cuales pueden influir en los patrones de desgasificación de los sistemas volcánicos en el norte de Chile (e.g. volcán Isluga; Aguilera et al, 2020).

Para el caso del volcán Lastarria, trabajos indican que las variaciones entre las mediciones realizadas en 2012 (Tamburello et al, 2014) y 2014 (López et al, 2018), pueden estar atribuidas a variaciones del sistema magmático a niveles someros, posiblemente atribuidos a desgasificación por descompresión o inducida por cristalización. Con respecto al periodo en estudio, los valores promedios obtenidos mediante DOAS y PiCam son similares a los obtenidos en 2014 por Lopez et al (2018) (ver Tabla II).

Tabla II. Tasas de emisión SO_2 medidos previamente. Las referencias corresponden a: [1]Aguilera et al, 2020; [2]Bobrowski, 2005; [3]Clavero et al. 2006; [4]Tamburello et al. 2014;[5]OVDAS-SERNAGEOMIN, 2014; [6]López et al. 2018.

Volcán	Fecha	Metodología	Tasas de emisión ton/día		Referencia
			Promedio ± 1σ	Máximo	
Olca	01/03/2018	Cámara UV	18,4 ± 13,4	58,4	1
Ollagüe	5-7/12/2004	DOAS	2,2		2
	Diciembre/2004	DOAS	4,5	9,1	3
	11-12/12/2013	DOAS	150 ± 162		4
	Mayo/2014	DOAS	150		5
	01/03/2018	Cámara UV	14,3 ± 3,1	34,2	1
	02/03/2018	Cámara UV	10,7 ± 3,5	139,1	1
Lastarria	27-28/11/12	DOAS	883,6 ± 779	2869	4
	22/11/14	DOAS y Cámara UV	604 ± 296		6

A pesar de que estos sistemas no tienen registro de actividad eruptiva histórica y presenta un largo registro de desgasificación pasiva. Aguilera et al. (2020), indica que la gran variación en las tasas de emisión SO_2 entre cada sistema pueden estar asociados al origen de sus fluidos. Clasificándolos en: i) sistemas con bajas tasas de emisión < 20 ton/día, relacionado a volcanes con acotados campos fumarólicos de baja temperatura (< 110 °C, Ollagüe), con fluidos enriquecidos en componentes hidrotermales (e.g. H_2S, CH_4), como los volcanes Olca y Ollagüe; y ii) sistemas con moderadas tasas de emisión de >20 ton/día, asociados a campos fumarólicos de alta temperatura (< 408 °C) y fluidos enriquecidos en componentes magmáticos (e.g. SO_2), como el volcán Lastarria.

CONCLUSIONES

Tanto el DOAS como la PiCam (Cámara UV de bajo costo) son metodologías útiles para la medición de las tasas de emisión de SO_2 en sistemas con bajas a moderados

valores. Las principales diferencias entre estas metodologías, es la forma detectar las bandas de absorción de SO_2 en el espectro UV de la luz. Mediante un monitoreo continuo de estos sistemas en conjunto con otras técnicas de monitoreo, nos permitirá evaluar posibles perturbaciones a corto y mediano plazo en el sistema.

A pesar de que estos volcanes de la Región de Antofagasta estén catalogados como sistemas con intermedio a bajo riesgo específico en el ranking volcánico chileno del 2020 (SERNAGEOMIN, 2020). Es necesario monitorear constantemente su actividad y generar planes de mitigación aplicados a las comunidades y equipamiento cercanos a ellos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el Gobierno Regional de Antofagasta, Chile, FIC-R, Código BIP 30488832-0 "Mitigación del riesgo asociado a procesos volcánicos en la Región de Antofagasta", ejecutado por Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico – Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile. Agradecemos por su apoyo en terreno a Alexander Scheinost, Álvaro Vergara, Álvaro Zavala, Bárbara Fernández, Alfredo Esquivel y Manuel Inostroza.

REFERENCIAS

Aguilera, F. *Origen Y Naturaleza De Los Fluidos En Los Sistemas Volcánicos, Geotermales Y Termales De Baja Entalpía De La Zona Volcánica Central (ZVC) Entre Los 17°43'S y 25°10'S*. Fundación Bicentenario, Santiago, Chile, 2010.

Aguilera, F., Layana, S., Rojas, F., Arratia, P., Wilkes, T.C., González, C., Inostroza, M., McGonigle, A.J., Pering, T.D., and Ureta, G. First Measurements of Gas Flux with a Low-Cost Smartphone Sensor-Based UV Camera on the Volcanoes of Northern Chile. *Remote Sens*., 12, 2122. (2020).

Aguilera, F., Tassi, F., Darrah, T., and Moune, S. Geochemical model of a magmatic–hydrothermal system at the Lastarria volcano, northern Chile. *Bull. Volcanol.* 74, 119-34 (2012)

Aiuppa, A. Volcanic-gas monitoring. Schmidt, A., Fristad, K. and Elkins-Tanton, L (Eds) *Volcanism and Global Environmental Change*. Univ. Press, Oxford, 2015.

Andres, R., Rose, W., Kyle, P., de Silva, S., Francis, P., Gardeweg, M. and Moreno, H. Excessive sulfur dioxide emissions from Chilean volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 46, 323–329 (1991).

Bobrowski, N. Volcanic gas studies by multi-axis differential optical absorption spectroscopy. *MPI Chemie*, IMPRS, 2005.

Carn, S.A., Clarisse, L. and Prata, A.J. Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 311, 99–134 (2016).

Carn, S.A., Fioletov, V.E., McLinden, C.A., Li, C. and Krotkov, N.A. A decade of global volcanic SO_2 emissions measured from space. *Sci. Rep.* 7, 44095 (2017).

Casertano, L. General characteristics of active Andean volcanoes and a summary of their activities during recent centuries. *Bull. Seismol Soc. Am.* 53, 1415–1433 (1963)

Clavero, J., Soler, V., & Amigo, A. Caracterización preliminar de la actividad sísmica y de desgasificación pasiva de volcanes activos de los Andes Centrales del norte de Chile. En: *11th Chilean Geological Congres.* Antofagasta, Chile, 443-446, (2006).

de Silva, S.L., and Francis, P.W. *Volcanoes of the central Andes*. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1991.

Kern, C., Lubcke, P., Bobrowski, N., Campion, R., Mori, T., Smekens, J.F., … and Prata, F. Intercomparison of SO_2 camera systems for imaging volcanic gas plumes. *J. Volcanol. Geotherm. Res*., 300, 22–36 (2015).

Galle, B., Johansson, M., Rivera, C., Zhang, Y., Kihlman, M., Kern, C., Lehmann, T., Platt, U., Arellano, S., and Hidalgo, S. Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)—A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description. *J. Geophys. Res.* 115, D05304 (2010).

Galle, B., Oppenheimer, C., Geyer, A., McGonigle, A., Edmonds, M., and Horrocks, L.A. A miniaturized ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO_2 fluxes: a new tool for volcano surveillance. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 119, 241-254 (2002).

Gardeweg, M., Selles, D., Arcos, R., Pino, H., Camacho, J., Sprohnle, C., Sanhueza, A., and Mont, A. Volcanismo del Cenozoico tardío al este de Collahuasi, Región de Tarapacá, Chile. En: *XII Congreso Geológico Chileno*, Santiago, Chile, 2009.

Garreaud, R.D. A multi-scale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 901-921 (1999).

Giggenbach, W. Chemical composition of volcanic gases. *Monitoring and mitigation of Volcano Hazards*. Scarpa, R., Tilling, R. (Eds), Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1996.

Global Volcanism Program (GVP). Report on Lascar (Chile). Venzke, E. (Ed.) *BGVN*. Smithsonian Institution, 18:4 (1993) https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199304-355100.

Global Volcanism Program (GVP). Report on Lascar (Chile). Wunderman, R. (Ed.) *BGVN*. Smithsonian Institution. 20:3 (1995) https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN199503-355100.

Global Volcanism Program (GVP). Report on Lascar (Chile). Wunderman, R. (Ed.) *BGVN*. Smithsonian Institution. 30:5 (2005) https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200505-355100.

González-Ferran, O. *Volcanes de Chile.* Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile, 1995.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... and Simmons, A. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146(730), 1999-2049 (2020).

Lopez, T., Aguilera, F., Tassi, F., de Moore, M.J., Bobrowski, N., Aiuppa, A., Tamburello, G., Rizzo, A., Liuzzo, M., Viveiros, F., Cardellini, C., Silva, C., Fischer, T., Jean-Baptiste P., Kazayaha, R., Hidalgo, S., Malowany, K., Lucic, G., Bagnato, E., Bergsson, B., Reath, K., Liotta, M., Carn, S., and Chiodini, G. New constraints on the magmatic-hydrothermal system and volatile budget of Lastarria Volcano, Chile: Integrated results from the 2014 IAVCEI CCVG 12th Volcanic GasWorkshop. *Geosphere*, 14, 983–1007 (2018).

Martínez, S., Navas, S., González, C., and Aguilera, F. Geología del Complejo Volcánico Olca-Paruma, Norte de Chile. En: *12º Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra*, Mendoza, Argentina, 2017.

McGonigle, A.J., Pering, T.D., Wilkes, T.C., Tamburello, G., D'Aleo, R., Bitetto, M., Aiuppa, A., and Willmott, J.R. Ultraviolet imaging of volcanic plumes: A new paradigm in volcanology. *Geosciences*, 7(3), 68 (2017).

Mori, T., and Burton, M.R. The SO_2 camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO_2 in volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24804 (2006).

Naranjo, J.A. *Geología del Complejo Volcánico Lastarria, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería Carta Geológica de Chile 123, escala 1:25,000, 2010.

Naranjo, J.A., and Cornejo, P. *Hoja Salar de la Isla*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 72, escala 1:250,000, 1992.

Oppenheimer, C., Scaillet, B. and Martin, R. S. Sulfur degassing from volcanoes: Source conditions, surveillance, plume chemistry and impacts. Rev. Mineral. Geochem. 73, 363–421 (2011).

OVDAS-SERNAGEOMIN. Reporte de Actividad Volcánica (RAV). Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, 5 (2014).

OVDAS-SERNAGEOMIN. Reporte de Actividad Volcánica (RAV). Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, 11 (2019).

Rodríguez, L., and Nadeau, P. Resumen de las principales técnicas de percepción remota usadas en volcanes para monitorear las emisiones de gas en la superficie. *Rev. Geol. Am. Cent.* 52, 67-105 (2015).

Sawyer, G.M., Oppenheimer, C., Tsanev, V.I., and Yirgu, G. Magmatic degassing at Erta 'Ale volcano, Ethiopia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 837-846 (2008).

SERNAGEOMIN. *Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile*. SERNAGEOMIN, Santiago, Chile, 2020.

Spark, R.S.J. Forecasting volcanic eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*210 (1), 1-15 (2003).

Sparks, R.S.J., Biggs, J., and Neuberg, J.W. Monitoring Volcanoes. *Science*. 335 (6074), 1310-1311 (2012).

Stebel, K., Amigo, A., Thomas, H., and Prata, A.J. First estimate of fumarolic SO_2 fluxes from Putana volcano, Chile, using an ultraviolet imaging camera. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 300, 112-120 (2015).

Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J., Parada, M., and Skewes, M. Chilean volcanoes. Moreno, T., and Gibbons, W. (Eds.) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, UK, 2007.

Tamburello, G., Hansteen, T.H., Bredemeyer, S., Aiuppa, A., and Tassi, F. Gas emissions from five volcanoes innorthern Chile and implications for the volatiles budget of the Central Volcanic Zone. *Geophys. Res. Lett.* 41, 4961–4969 (2014).

Tassi, F., Aguilera, F., Vaselli, O., Darrah, T., and Medina, E. Gas discharges from four remote volcanoes in northern Chile (Putana, Olca, Irruputuncu and Alitar): A geochemical survey. *Ann. Geophys*. 54, 121–136 (2011).

Vaselli, O., Tassi, F., Montegrossi, G., Capaccioni, B., and Giannini, L. Sampling and analysis of fumarolic gases. *Acta Vulcanol*. 18, 65–76 (2006).

Wilkes, T.C., McGonigle, A.J.S., Pering, T.D., Taggart, A.J., White, B.S., Bryant, R.G., and Willmott, J.R. Ultraviolet imaging with low cost smartphone sensors: Development and application of a raspberry Pi-based UV camera. *Sensors*, 16, 1649 (2016).

Wilkes, T.C., Pering, T.D., McGonigle, A.J.S., Tamburello, G., and Willmott, J.R. A low-cost smartphone sensor-based UV camera for volcanic SO_2 emission measurements. *Remote Sens.*, 9, 27 (2017).

Wilkes, T.C., Pering, T. D., McGonigle, A.J.S., Willmott, J.R., Bryant, R., Smalley, A.L., ... and England, R.A. The PiSpec: a low-cost, 3D-printed spectrometer for measuring volcanic SO2 emission rates. *Frontiers in Earth Science*, 7, 65. (2019).

Wörner, G., Hammerschmidt, K., Henjes-Kunst, F., Lezaun, J., and Wilke, H. Geochronology (40Ar/39Ar, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18–22 S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Rev. Geol. Chile*, 27, 205–240 (2000).

MODERNIDAD, OASIS Y DESIERTO: EL ARBOLADO PÚBLICO Y LA CONFIGURACIÓN DEL ESPACIO EN LA CIUDAD DE SAN RAFAEL, MENDOZA, ARGENTINA

Guerci A. [a b], Paulides L.S.[b], Cornejo C.[b], Farina L.[b], Mondeja S.[b], Freire L. F.[c] y Negreira G.[b]

[a]*FCEN, Universidad Nacional de Cuyo, sede Gral. Alvear, ARGENTINA*
[b]*MHNSR, Museo de Historia Natural de San Rafael, ARGENTINA*
[c]*Instituto Profesorado de Arte 9-014, ARGENTINA*

e-mail: alejandraguerci3@gmail.com

RESUMEN

El arbolado público, además de su valor ornamental y de enriquecer el patrimonio de la comunidad, contribuye a mejorar la calidad ambiental. El objetivo de este trabajo es evaluar cómo se conformó el arbolado público (bosque urbano artificial) en la ciudad de San Rafael y su ejido urbano en distintos períodos históricos. El departamento de San Rafael representa un ejemplo del avance de la Modernidad sobre el control de la naturaleza: la agricultura de cultivos introducidos en un ambiente desértico, el uso de un sistema artificial de riego, el control de los cursos de los ríos Diamante y Atuel han definido su desarrollo económico desde fines del siglo XIX hasta la actualidad. Si bien en este avance sobre el territorio, el clima templado y seco, y el paisaje semi-árido no fueron condicionantes para emplazar el primer enclave colonizatorio (1805, Fuerte de la actual Villa 25 de Mayo, sobre la margen norte del río Diamante), sí imprimieron las condiciones de su refundación hacia 1903, en torno a la Colonia Francesa y el ferrocarril. Con el desarrollo de la nueva ciudad se configura un marco urbanístico que recurre a transformar su fisonomía por medio de diferentes recursos, entre los que se cuenta el arbolado introducido con el cual se ordena la naturaleza según la Modernidad. Con el uso de los archivos históricos y fotográficos de Juan Pi (1903-1933) del Museo de Historia Natural de San Rafael analizamos este proceso de transformación del desierto hacia la conformación del Oasis Sur (Pérez Winter C., 2011). Consideramos que el arbolado, no es un elemento accesorio en el desarrollo de la matriz de urbanización, sino que su uso representa una racionalidad sobre la naturaleza encarnada en un modelo forestal con elementos característicos y de valor patrimonial de las denominadas "ciudades oasis" (Bórmida E., 1989).

Palabras Clave: Arbolado público, Ciudad-Oasis, San Rafael.

INTRODUCCIÓN

El departamento de San Rafael tiene una superficie de 31.235 km^2 y representa el 20% de la superficie de la provincia de Mendoza, y se ubica en el centro-oeste de la Argentina. El relieve es heterogéneo con un gradiente altitudinal que varía en el sentido oeste-este atravesando altas cumbres, sierras, depresiones y llanuras. El área está incluida en la llamada Diagonal Árida Sudamericana[1] (Bruniard E., 1995) con

[1] Franja extensa que incluye territorios con precipitaciones inferiores a los 200 mm anuales que se extiende desde los 22º S en el límite argentino-chileno hasta los 44º S de la costa atlántica de Argentina.

precipitaciones que van desde los 250 a 300 mm en la planicie oriental en el verano y hasta los 900 mm en la Cordillera de los Andes durante el invierno. La temperatura media anual oscila entre 8,1º C y 23,1°C (Capitanelli R., 2005; Norte F., 2000) con un paisaje y clima árido y semi-árido.
La ciudad de San Rafael se sitúa en las planicies aluviales de los ríos Diamante y Atuel que irrigan el departamento homónimo (ver Figura 1). Es un oasis artificial cuya administración, regulación y ordenamiento del uso del agua se vehiculiza a través de un sistema de riego. Por esta razón, estas obras son una parte fundamental de nuestra historia y constituyen uno de nuestros patrimonios culturales más valiosos (Bórmida E., 1989; Ponte R., 2017).
Siguiendo a Denis P. Y (1969), podemos distinguir 4 momentos en el desarrollo del Oasis-Sur en el departamento de San Rafael: 1.Etapa 1805-1870: fundación del Fuerte Villa 25 de Mayo y colonización rural, 2.Etapa 1872-1900: traslado de la guarnición militar de la Villa y organización del terreno en colonias, 3.Etapa 1903-1930: fundación de la Nueva Villa de San Rafael e inauguración del ferrocarril y 4. Etapa 1930-1960: desarrollo urbano e inauguración de espacios verdes (*e.g* Parque Hipólito Yrigoyen). Este proceso gradual implicó una conversión en cabecera administrativa departamental y el cambio en el perfil económico que mutó del modelo agrícola-ganadero tradicional a uno vitivinícola y frutícola. Respecto a la ciudad, su planificación urbanística incluirá nuevos recursos como el arbolado *introducido* que reinventa no sólo el paisaje, sino también un modelo de naturaleza ordenada y modos de percibir según los principios del racionalismo instrumental de la Modernidad (Bórmida E., 1989; Benassi A. H., 2015; Gillespie M.A., 2008).
La fotografía *de frontera* acompaña este proceso y es el único registro que documenta visualmente a la colonización del territorio (Lacoste, P. and Priamo, L., 1994). Desde una perspectiva histórica y florística estas capturas tienen un gran potencial para estimar el arribo y la selección de especies y sus usos más frecuentes en medios urbanos y rurales y otros atributos del arbolado público.

MODERNIDAD, OASIS Y ARBOLADO PÚBLICO

El oasis es una transformación del ambiente y una construcción del territorio por medio de la cual no sólo se estructura un ordenamiento y dinámica social, sino que se imprime un tipo de racionalidad o un *habitus* particular respecto al rol de la naturaleza. Esta última, es externa a la nueva configuración socio-territorial y es pensada como un *instrumento* que debe adecuarse al nuevo entorno y a las capacidades económicas para las cuales puede ser explotada (Dobson A., 2000; Parraguez Sánchez L. et al, 2006). En función de este marco antropocéntrico y utilitario, el desierto es un obstáculo, una frontera, separada de estos paisajes antropizados de la Modernidad.
El Estado central organiza la planificación que recae fuertemente en un optimismo tecnológico y en la confianza del progreso sin límites, vinculado al desarrollo científico y al conocimiento de las leyes que dan cuenta de los sistemas naturales y sus relaciones intrínsecas. Asimismo, este moderno proyecto liberal lleva una fuerte impronta de racionalidad civilizatoria y eurocéntrica, que se asienta en un elogio de lo nuevo, de la razón y los valores vinculados al universalismo, el orden y la homogeneidad (Pinzón J.A., 2012).

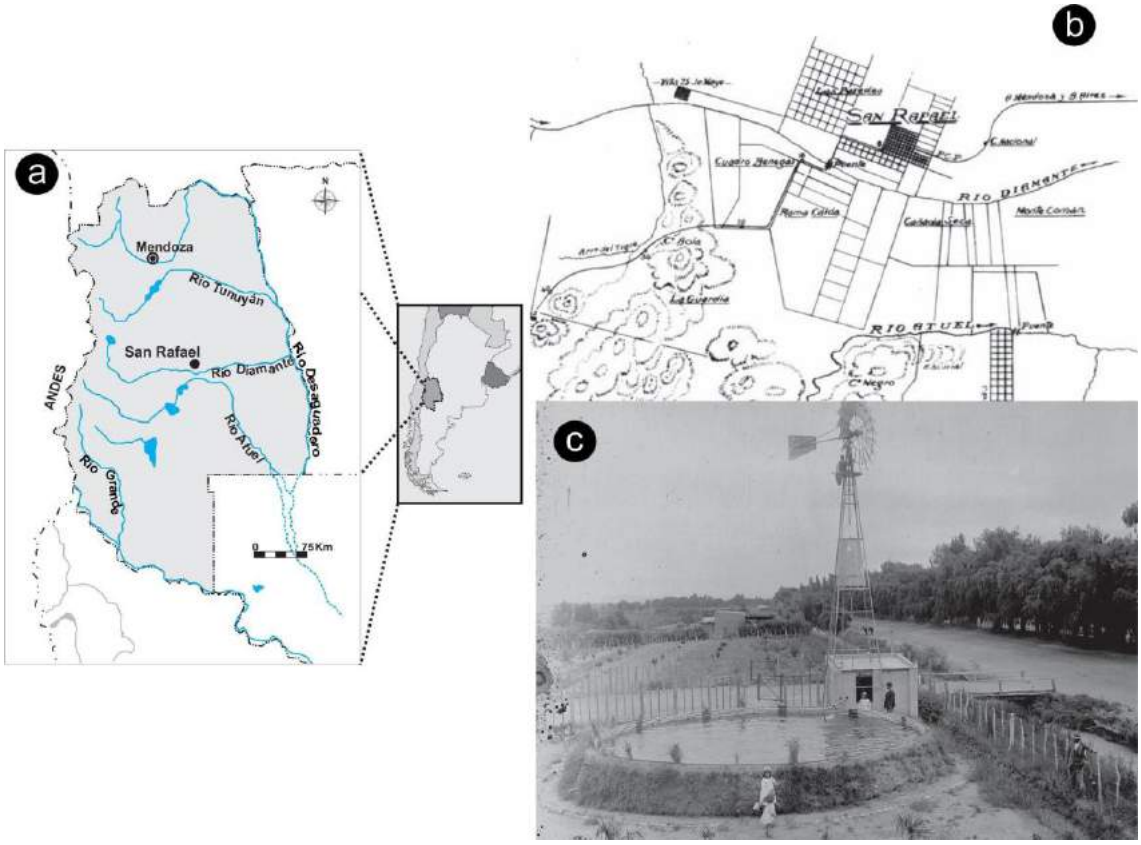


Figura 1 - La ciudad Oasis de San Rafael, Mendoza. a. Situación relativa de la ciudad de San Rafael en Mendoza y Argentina, b. Mensura de Tierras de San Rafael, 1925 (col. Juan Pi, nro. 1265) y c. Foto de tanque australiano y molino Samson - hecho por Stover, Illinois, ca. 1918 (col. Juan Pi, nro.0556).

George P. (1966) caracteriza al oasis como un ambiente antropizado que comprende una *"(...) pequeña superficie de agricultura intensiva que constituye excepción, y espacialmente mancha, en una región inadecuada para el cultivo, desierto o semidesierto. Esta excepción reposa en la movilización del riego, que aquí es un bien raro, y por consiguiente una base económica sin la cual la tierra no vale nada".*

La invención de estas *ciudades-oasis* se constituye sobre el desarrollo de una *macroestructura espacial de tipo natural* (Bórmida E., 1989) que incorpora 4 elementos: agua, tierra, trabajo y edificios. En el caso de San Rafael, se desarrollaron formas *industriales de movilización del agua*, con grandes embalses y redes de distribución del fluido, surgiendo así una nueva administración del área cultivable y nuevas relaciones sociales con nuevos actores (*e.g* organismos de irrigación, burocracia, regantes, minifundistas, grandes bodegueros, entre otros) (George P., 1966).

El ingeniero Julio Ballofet diseñó el trazado de la ciudad de San Rafael *ca*. 1870. Los elementos urbanísticos combinan la plaza fuerte o central y el damero colonial con tradiciones europeas de comienzos del s. XX como las *squares* inglesas y las diagonales y bulevares y parquización que emulaban a París (Bórmida E., 1989). Es una propuesta regida por los principios de *orden* (*e.g* damero, jerarquía y separación de espacios), *regularidad* (*e.g* ritmos, proporcionalidad), *eficiencia* (*e.g* en el ordenamiento de la vida cotidiana, como ser el tránsito y el riego) e *higiene* (*e.g* carácter purificador de las arboledas y la circulación del agua como mitigador del polvo).

Bajo este encuadre, el arbolado público asumiría - junto con otros elementos - un rol de *artefacto urbano* (Bórmida E., 1989; Benassi A.H., 2015) a partir del cual se construye

el espacio urbano y público. Por arbolado público entendemos "*(...) al existente en calles, caminos, plazas, parques y demás lugares o sitios públicos y al que exista plantado en las márgenes de ríos, arroyos y cauces artificiales o naturales del dominio público o privado al servicio de la irrigación y de la vialidad.*" (Ley Provincial 7873/2008, de Arbolado Público).

Por lo tanto, este tipo de arbolado se diferencia del rural *preexistente* a la fundación de 1903, puesto que reúne en un único artefacto urbano dos ámbitos de interacción: por un lado, el del espacio público (dominio público) jerarquizado, regulado, organizado, equipado y; por el otro, el de "la esfera pública" permitiendo el encuentro, la visibilidad, la comunicación "entre" o "inter" estratos sociales en donde se desarrolla la opinión pública en el marco de las democracias modernas (Ricart N. and Remesar A., 2013). En función de esta idea, planteamos que *el arbolado público constituyó un artefacto urbano que representó la racionalidad de un modelo paisajístico-urbanístico de la Modernidad diferenciado del arbolado rural pre-existente a la fundación de la ciudad-oasis de San Rafael en 1903 en del sur de la provincia de Mendoza*.

Esperamos que existan diferencias entre los dos tipos de arbolado en su diversidad taxonómica, en los patrones espaciales de su plantación y en el uso diferencial de especies según el contexto (rural *vs*. urbano). Asimismo, creemos que los primeros usos del arbolado se relacionan con el avance colonizador ejemplificados en el puesto rural y las barreras cortavientos, por un lado y por el otro; con la plantación frutal y los espacios verdes o jardines de grandes propiedades rurales. Posteriormente, y con el diseño de la nueva ciudad, el desarrollo urbano introduce un sentido paisajístico y ornamental.

METODOLOGÍA

Las fotografías son documentos que reflejan la dinámica del diseño y crecimiento urbanístico, como también los cambios experimentados en el medio rural y la evolución en el uso del territorio del Oasis Sur. Las fotografías antiguas pueden compararse con registros actuales disponibles como los generados a partir de relevamientos por LiDAR o el uso de panorámicas actuales generadas por *street view* de Google Maps, entre otros (Bierman P. R. et al, 2005; Krajter Ostoi S. et al, 2019; Branson S. et al, 2019).

Las obras de los fotógrafos Juan Pi[2] (obras entre 1903-1933) y Eliseo Miri (obras entre 1947-1969) capturaron dos momentos en el desarrollo del Oasis-Sur, en los cuales reflejaron diferentes entornos espaciales, actividades económicas y culturales, actores cotidianos, etc.

Si bien Pérez Winter C. (2011) clasificó la colección temática de la obra de Juan Pi, este trabajo no incluyó al arbolado público. Teniendo esto presente, se analizan diferentes atributos y variables de las fotografías con presencia de especies arbóreas (ver Tabla I). La observación de los criterios dependerá según el estado de conservación, la escala, el contraste, resolución/grano y detalles de las fotos (Boadas J. et al, 2001; Bustos I.G., 2017).

[2] Los registros fotográficos de la Colección Juan Pi utilizados en este artículo constituyen parte del Archivo Documental del Museo de Historia Natural de San Rafael.

Tabla I - Atributos y variables para el análisis de fotografías del arbolado público.

Atributo	Variables
Documento	Colección, autor, nro. o código de registro, lugar, año.
Ubicación	Contexto, tipo de arbolado (Ley 7873), patrón de plantación.
Caracterización Taxonómica	Familia, género y especie.
Caracterización Morfológica	Follaje, forma de copa, hoja según tipo de borde y limbo, tipo de corteza, fuste, ramas y altura.
Datos Fenológicos	Presencia de flor o fruto.
Trabajos Culturales	Poda de follaje, alteraciones fuste, nicho en calzada.
Situación actual	Presencia/Ausencia, Reforestado.

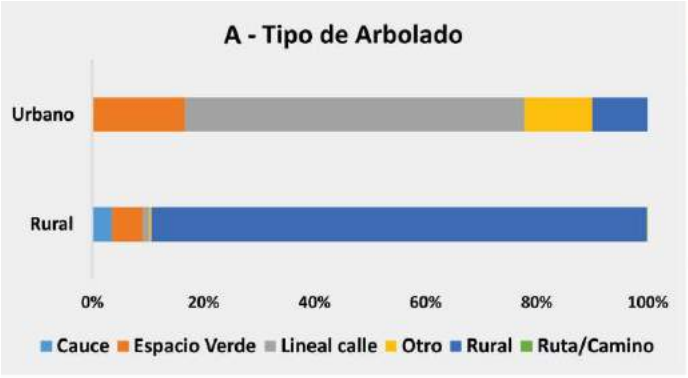
El atributo *documento* historiza el momento y lugar de la toma fotográfica. La *ubicación* actúa como nomenclador respecto a su caracterización según criterios de la Ley provincial 7873 y el patrón de plantación. En cuanto a la *caracterización taxonómica*, facilita la identificación del forestal utilizado y las preferencias por tipo de especie para cada uso (*e.g* arbolado de alineación, de espacios verdes, rural, de canales de riego, etc.). Cuando este atributo no esté disponible, se complementa con la *caracterización morfológica* y los *datos fenológicos*. En cuanto a los *trabajos culturales* registramos alteraciones que modificaron aspectos de la morfología y del crecimiento. Por último, con *situación actual* cotejamos la evolución de los forestales a lo largo del tiempo para analizar aspectos de su dinámica (crecimiento, reemplazo, podas, etc.).

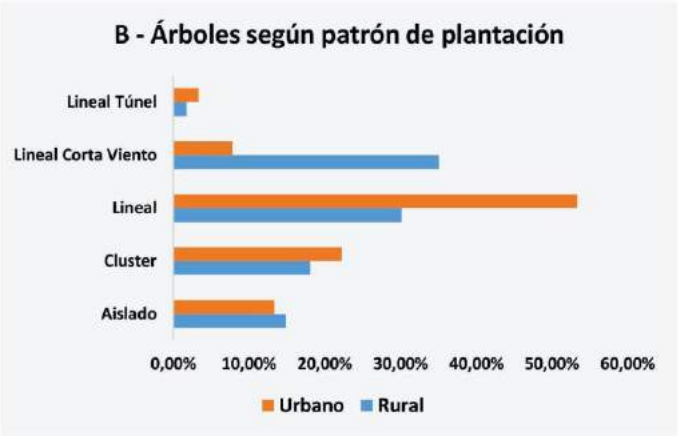
RESULTADOS

Sobre un total de 908 fotos de la colección Juan Pi, se seleccionaron 431 (47,5% del total) con especies arbóreas. No existen datos precisos sobre algunos *loci* y los años de las tomas, pero se puede estimar que las mismas se corresponden con las Etapas 2 y 3 del desarrollo del Oasis-Sur mencionadas *ut supra.* Sobre el total de las fotografías analizadas, el 21% (n=90) corresponden al contexto urbano, mientras que el 79% restante (n=341) son del ámbito rural.

En la Figura 2.a, existen marcadas diferencias entre el contexto urbano y el rural. En primer lugar y con relación al tipo de arbolado, en el primero de los contextos predomina el "lineal calle", y en menor proporción el de espacio verde y el rural, y en similar frecuencia *otros* (árboles aislados y en clusters). En el contexto rural, existe un 90% de arbolado tipo *rural* y el 10% restante compuesto por *cauce*, *espacio verde y lineal calle.* En segundo lugar, la Figura 2.b muestra que el patrón de plantación en el contexto urbano se orienta hacia un ordenamiento lineal de los forestales en función de un complemento del trazado en damero del ejido urbano. En contraposición, el contexto rural se destaca por un patrón *lineal cortaviento*, orientado a la protección de cultivos. En tercer lugar, se observa en la Figura 2.c que existe un nTaxa=20 en el contexto rural, mientras que en el contexto urbano un nTaxa=15. En cuanto a las taxa más

representativas del primer contexto, se destaca *Populus sp.* y *Salix sp.* en menor proporción. En el contexto urbano, *Populus sp.* predomina junto con *Platanus sp*.





C - Lista Florística

Género	Rural	Urbano	Total
Acacia	0,3%	4,4%	1,2%
Casuarina	2,1%	1,1%	1,9%
Cupressus	2,4%	5,6%	3,0%
Eucalyptus	0,6%	2,2%	0,9%
Geoffroea	0,6%	-	0,5%
Juglans	2,1%	-	1,6%
Magnolia	0,3%	1,1%	0,5%
Malus	2,3%	-	1,9%
Morus	1,5%	3,3%	1,9%
Olea	0,6%	-	0,5%
Phoenix	0,6%	2,2%	0,9%
Pinus	1,5%	2,2%	1,6%
Platanus	2,1%	22,2%	6,3%
Populus	44,0%	28,9%	40,8%
Prosopis	0,3%	-	0,2%
Prunus	10,6%	-	8,4%
Pyrus	2,3%	-	1,9%
Robinia	2,3%	3,3%	2,6%
Salix	17,3%	7,8%	15,3%
Schinus	0,3%	1,1%	0,5%
Tamarix	0,3%	-	0,2%
Thuja	0,9%	-	0,7%
Washingtoniana	1,5%	2,2%	1,6%
Indeterminada	3,5%	12,2%	5,3%
Total	**100%**	**100%**	**100%**

Figura 2: A: Tipo de arbolado según Ley 7873/2008, B. Árboles según patrón de plantación y C. Lista florística según contexto rural y urbano.

Las Figuras 3, 4, 5 y 6 evidencian la evolución del arbolado público en la ciudad de San Rafael en base al archivo fotográfico de Pi. En términos temporales, existen ciertos árboles vinculados al ámbito rural en puestos y establecimientos de agricultura extensiva e intensiva, representados por álamo (*Populus* sp.), álamo carolino (*Populus deltoides*) (ver Figura 3.b), álamo blanco (*Populus alba*) (Figura 3.a) y la combinación de especies de álamos, sauces y eucaliptos (Figura 4.a y 4.b) que se corresponden a los primeros momentos de la colonización. Este arbolado se presenta en patrones lineales (*e.g* hileras de álamos en cortavientos para protección de cultivos frutales) o bien en torno a una construcción (*e.g* corral, ver Figura 5.a) o un sitio de habitación o recinto (*e.g* puesto, ver Figura 5.b).

Con el traslado de la ciudad a la Colonia Francesa en 1903, el arbolado público sufre algunas diferencias respecto de su antecesor rural. En primer lugar, se asocia con un sistema de irrigación con acequias (ver detalle Figura 6.c). En segundo lugar, la diversidad taxonómica es menor a la rural (ver Figura 2.c) ya que se priorizan especies vinculadas al patrón *lineal calle* y un valor urbano-paisajístico como *Platanus sp.*y *Populus sp.*. En tercer lugar, el distanciamiento entre ejemplares es mayor, existe un cuidado de los fustes y una búsqueda de la simetría de los mismos, al igual que las morfologías de las copas, fundamentalmente formando galerías en las avenidas (ver Figura 2.b *lineal túnel*). Para *ca.* 1910-1920, se incorporan también especies destinadas a un uso ornamental en plazas o espacios de esparcimiento público como las palmeras,

cipreses, pinos y magnolias, entre otras (ver Figura 6.d con la palmera *Phoenix canariensis* en primer plano).

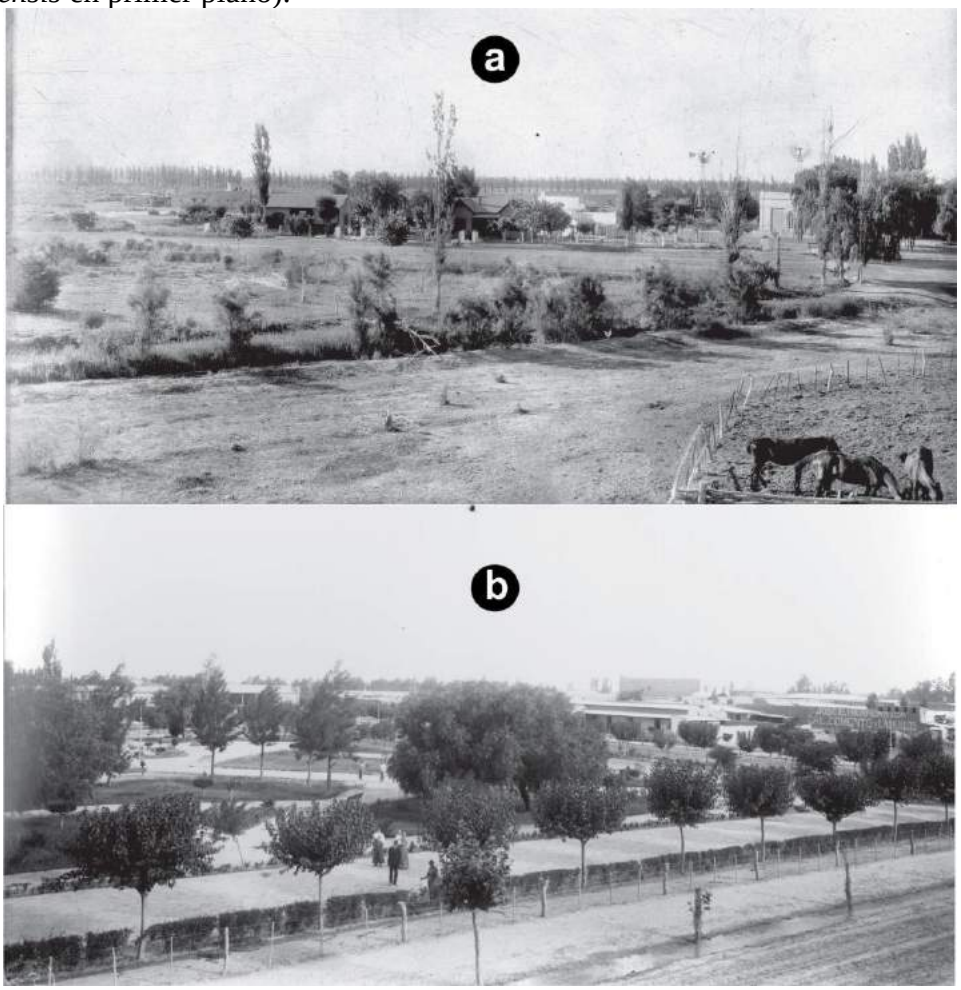


Figura 3: Dos tipos de arbolado: a. Arbolado rural preexistente a la fundación de 1903 (col. Juan Pi, nro. 0666), b: Arbolado público ciudad de San Rafael *ca.* 1920 (col. Juan Pi, nro. 0671).



Figura 4 - Arbolado representativo del ámbito rural. a. Hilera de álamo blanco en plantación frutícola (col. Juan Pi, nro. 0553), b. Corral con álamo carolino en primer plano y sauces. (col. Juan Pi, nro. 0792).

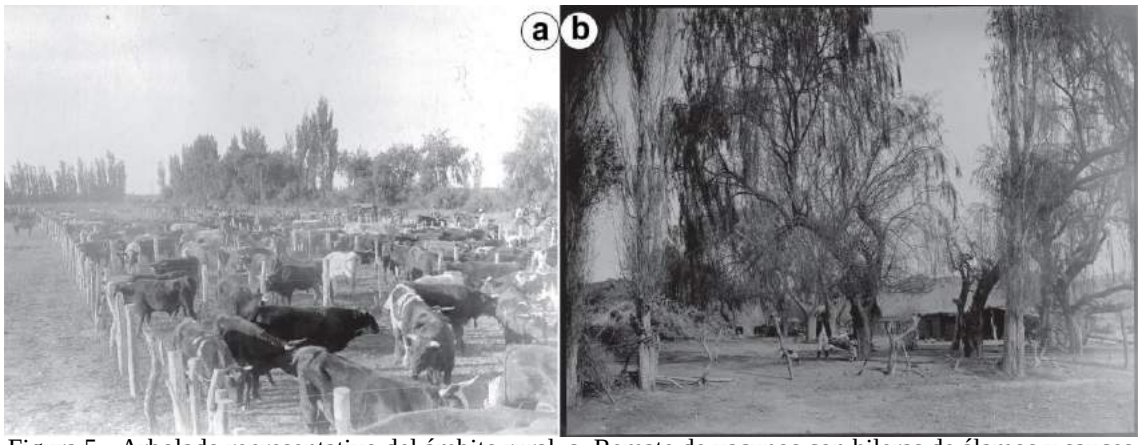


Figura 5 - Arbolado representativo del ámbito rural. a. Remate de vacunos con hileras de álamos y sauces (col. Juan Pi, nro. 1101), b. Puesto con sauces, álamos, carolinos y eucaliptos (col. Juan Pi, nro. 0736).



Figura 6 - Arbolado urbano décadas 1900-1930, ciudad de San Rafael. a. Municipalidad de San Rafael, 1908 (col. Juan Pi, nro. 0653) y b. Plátanos en el mismo edificio, 1920 (col. Juan Pi, nro.1241), c. Detalle de Plátanos y acequia (col. Juan Pi, nro. 0602), d. Plaza San Martín con palmera (col. Juan Pi, nro.1236)

Hacia finales de 1920, se inaugura el monumento ecuestre del Gral. José de San Martín (1928) y luego el Parque Hipólito Yrigoyen (1942), para el cual se plantan 30.000 nuevos ejemplares. Al ordenamiento y a la simetría del arbolado lineal (ver Figura 7.b), se le agrega el uso ornamental en el cual la planificación no sólo dimensiona el espacio, sino también disciplina el movimiento de los transeúntes dentro de éste y proporciona especies que crean una articulación volumétrica espacial con estratos acondicionados

diferenciados visualmente e incorporando nuevas especies forestales (Bórmida E., 1989; ver Fig. 7. a y c).

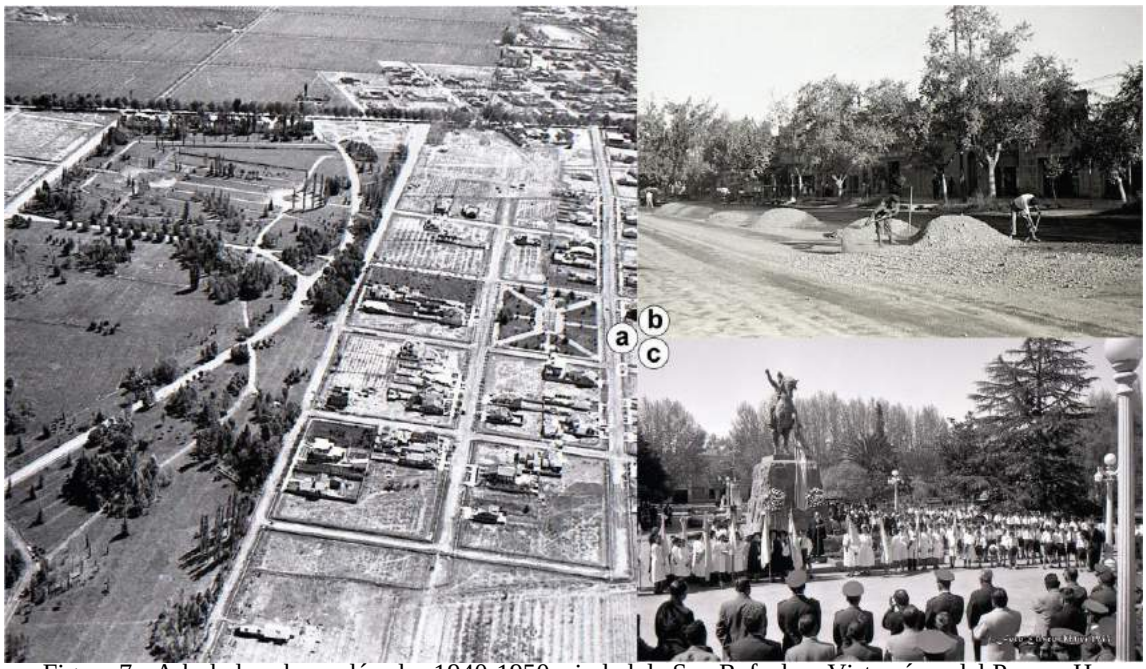


Figura 7 - Arbolado urbano décadas 1940-1950, ciudad de San Rafael. a. Vista aérea del Parque H. Yrigoyen y la Plaza Manuel Belgrano (col. E. Miri, nro. 091, 1953), b. Plátanos en Av. Mitre (col. E. Miri, nro. 613) y c. Articulación volumétrica Plaza San Martín (col. E. Miri, nro. 074, 1953)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Desde la etapa inicial y en los diferentes momentos del desarrollo del Oasis Sur, el árbol es un artefacto urbano con un rol significativo en la configuración de un modelo paisajístico-urbanístico de la Modernidad en la ciudad-oasis de San Rafael desde su fundación en 1903. La documentación - que por motivos de espacio hemos resumido aquí - permite sugerir que existen dos contextos de arbolado, en los cuales conviven similares características respecto a los patrones de disposición o plantado, pero con finalidades diferentes (*e.g* hileras formando cortinas forestales como cortaviento en el ambiente rural *versus* hileras de árboles en calles y avenidas). En cuanto a las especies, detectamos que en la ruralidad se combinan álamos y sauces, mientras que en la ciudad los álamos son menos frecuentes y se observan plátanos, sauces, acacias, moras y robles, entre otros.

El análisis fotográfico nos permite pensar que en una primera etapa colonizadora la funcionalidad del árbol se orientó al reparo de puestos rurales y la protección de cultivos con barreras verdes. En un segundo momento de esta etapa, el territorio se puebla de especies frutales y las viviendas incorporan nuevas especies para la creación de parques (*e.g Cupressus sp., Pinus sp., Magnolia sp.*).

Con posterioridad a esta etapa, y como observamos en algunas fotografías de Eliseo Miri, el desarrollo urbano se apropia de una nueva racionalidad que modela y reinventa el paisaje y crea una ciudad a partir de elementos que ya mencionamos (orden, simetría, volumen y estratos) y que se distingue del *uso agrícola/rural* por nuevas especies forestales que cobran protagonismo como ejemplares del género *Acer*, *Acacia*,

Fraxinus, Melia, Pinus, Platanus, Quercus, entre otros. Esta nueva mentalidad no solo se evidencia en el plano de las acciones de los actores involucrados, sino que además transforma el territorio dejando importantes correlatos visibles en la cultura material, como son las obras de canalización de cauces y el sistema de riego, las tierras cultivables y los patrones de localización de las especies arbóreas, parques y plazas, estructuras como esculturas, mobiliario, luminaria, etc.

Desde el punto de vista urbanístico la configuración de la ciudad es el resultado del diseño de un modelo en el cual el paisaje natural y el ambiente antropizado se superponen conformando nuevos espacios verdes y de vegetación en sus diversas expresiones – arbórea, arbustiva, cespitosa. En este contexto el bosque urbano, entendido como la suma total del recurso vegetal que crece en áreas urbanas – parques, plazas, patios y arbolado vial – es un componente fundamental del modelo de ciudad desarrollada bajo este enfoque moderno, racional/instrumental, eurocéntrico y universal. Es decir, la sustentabilidad ambiental de la zona urbana depende de la de su bosque urbano. Asimismo y considerando las condiciones geográfico-climáticas de aridez en donde se inserta la ciudad, la existencia de éste depende casi exclusivamente del recurso hídrico.

Las fotografías son testimonios documentales únicos y valiosos que reflejan un instante preciso en el crecimiento de un ejemplar arbóreo o conjunto de árboles, pero también permiten visualizar un instante en la evolución del ambiente antropizado en la historia reciente. La posibilidad de una fotografía temprana y de *frontera* como la de Juan Pi y la posterior obra de Eliseo Miri retratan en un sentido integral los momentos de este desarrollo y enriquecen el análisis y comprensión de estos procesos de cambio a escala local y regional.

En último lugar y con relación a las políticas de arbolado público en la actualidad, es necesario discutir los principios urbano-paisajísticos que sustentaron este proceso y su direccionalidad asumida en el pasado. Como consecuencia, advertimos la necesidad de incorporar en el arbolado público los atributos característicos de la vegetación del desierto como los que se presentan en xerofitas, halófitas y freatofitas, etc. con los requerimientos y posibilidades del presente tanto para responder a las problemáticas ambientales como a la impronta paisajística de valor local. Asimismo, el stress hídrico, el uso de la vegetación autóctona, la sanidad de los árboles existentes, etc. son variables necesarias para evaluar el estado del arbolado público del presente.

Esta situación se hace aún más notoria al considerar la dimensión y las características de los procesos acelerados de expansión urbana sobre antiguas tierras rurales en los contextos de negocios y especulación inmobiliaria. En función de estas dos realidades de comunidades florísticas (introducida y nativa) cobra importancia una ocupación equilibrada e integral del espacio entre el paisaje desértico, las dinámicas propias de la experiencia humana y las posibilidades del ambiente local.

Consideramos que en el marco de estas directrices, el arbolado público es un elemento constitutivo del oasis-sur y es un hecho histórico de carácter patrimonial necesario para el mantenimiento de un hábitat sustentable.

Agradecemos la generosa colaboración de María Elena Izuel, Luis Ballarini, Valentín Miri, Viviana Rebolloso y Angela Rebelles por sus valiosos aportes a este trabajo.

REFERENCIAS

Benassi, A.H. *Ciudad Botánica: Oasis del desierto urbano*, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP (2015). http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/52387 23.10.2020

Bierman, P.R.; Howe, J.; Stanley-Mann, E.; Peabody, M. and Massey, C.A. Old images record landscape change through time, *GSA Today 15, no. 4, 4-10.* (2005).

Boadas, J.; Casellas, L. E. and Suquet, M.A. *Manual para la gestión de fondos y colecciones fotográficas*, Biblioteca de la Imagen, Centre de Recerca i Difusió de la Imatge, Girona. (2001).

Branson, S.; Wegner, J.D.; Hall, D.; Lang, N.M Schindler, K. and Perona, P. From Google Maps to a fine-grained catalog of street trees, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 135, January 2018, 13-30 (2019).

Bórmida, E. Mendoza: una ciudad oasis. Mendoza. *Eratosthene-Shragide* 2: 6-25. (1989).

Bruniard, E. "La diagonal árida argentina: un límite climático real". *Revista Geográfica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. V. 95, 5–20. (1995).

Bustos, I.G. *Medidas de conservación aplicadas al archivo fotográfico Hernández-Pacheco de la Biblioteca Histórica Marqués de Valdecilla*, Universidad Complutense, Madrid. (2017)

Capitanelli, R. *Climas locales de la extremidad sur de las montañas.* En: Climatología de Mendoza. Ed. Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. (2005).

Denis, P. Y. San Rafael. La ciudad y su región. *Boletín de Estudios Geográficos*, V. XVI, 64-65. Mendoza. (1969).

Dobson, A. G*reen Political Thought*, Routledge, Londres. (2005).

George, P. Ensayo de tipología de los oasis, *Boletín de Estudios Geográficos* 51 (vol XIII), 117–133 (1966).

Gillespie, M. A The theological origins of modernity, Chicago, UCP, (2008).

Krajeter Ostoi, S.; Vuletic, L.; Planinšek, S.; Vilhar, U.; Japelj, A. Three Decades of Urban Forest and Green Space Research and Practice in Croatia and Slovenia, Forests 11(2):136, 2-27 (2020).

Lacoste, P. and Priamo, L. *Fotografías 1903-1933*. Editorial. Fundación Antorchas. Buenos Aires. (1994).

Marcó del Pont, R. *Historia del sud mendocino*. Editorial Buenos Aires. San Rafael. (1947).

Martínez, C.H.; Roig Juñent, F. A; Cavagnaro, B. and Cantón, M.A. Arbolado urbano: impacto del estrés hídrico en el crecimiento de forestales jóvenes de uso común en ciudades áridas, Mendoza, Argentina, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 33-36. (2008).

Norte, F. *Mapa climático de Mendoza*. En: Recursos y problemas ambientales de zona árida. Caracterización ambiental. Primera parte: provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja. Tomo I. Abraham E. and Rodríguez Martínez. F. (Ed.). Iadiza. Mendoza. (2000).

Parraguez Sánchez, L.; Rodríguez Loza, G. and Santander Bellei, M. ¿Cómo se piensa la ciudad? Análisis crítico de un siglo de gestión y planificación urbana, *Revista eure Vol. 32, nº96, 135.140, Santiago de Chile* (2006).

Pérez Winter, C. Oasis y desiertos: visualización de la conformación del Departamento de San Rafael durante la primera mitad del siglo XX (Mendoza, Argentina). R*evista Chilena de Antropología Visual* 17, 72-91. Santiago. (2011).

Pinzón, J. A. Modernidad, modernización en la urbanización del Tercer Mundo, *Ciudad Paz-ando 5 (1),* 95-106, Bogotá. (2012).

Ponte, R. "Historia del regadío: las acequias de Mendoza, Argentina". *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, V. 10, 218, pp. 7. Barcelona. (2006).

Ricart, N. and Remesar, A. Reflexiones sobre el espacio público, *On the W@terfront* 25, 5-25 (2013).

GEOLOGÍA POLÍTICA. VIGENCIA DE LOS PENSAMIENTOS DE AMÍLCAR HERRERA EN MATERIA DE RECURSOS MINERALES DE ARGENTINA Y AMÉRICA LATINA

Guerriero L., Kohler M. C. y Barros Cortés F.

Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA

e-mail: lucasguerriero@gmail.com

RESUMEN

En el centenario del nacimiento de Amílcar Oscar Herrera, buscamos revalorizar una faceta de su producción política y científica de gran vigencia en la construcción de un Proyecto Nacional y Regional, los recursos mineros. Mediante este trabajo, pretendemos recuperar las líneas propuestas por Herrera en sus producciones, acciones en la gestión pública y actividades docentes, estableciendo puntos de comparación con el presente, con el objetivo de resignificar y repensar las políticas del sector minero en Argentina y América Latina. Se analizaron para ello: datos estadísticos del sistema de educación superior público, el marco legislativo minero y educativo, datos macroeconómicos, y el registro histórico de las instituciones estatales vinculadas al sector minero en Argentina. Los análisis comparativos de diferentes épocas permitieron identificar avances en la creación y regulación de instituciones educativas, científicas y de gestión de recursos naturales en Argentina. Asimismo, se evidenció la existencia de problemáticas de índole social, territorial y ambiental vinculadas al desarrollo minero que constituyen un desafío para debatir, consensuar, y plasmar en las políticas futuras. Finalmente, las propuestas se orientan hacia un debate ciudadano que nos permita consensuar la implementación de políticas centralizadas para el territorio nacional, la adecuación del marco legal, la formación crítica de profesionales, la vinculación del sector tecnológico en la producción primaria y principalmente la integración de las demandas populares al modelo de desarrollo adoptado.

Palabras clave: Educación – Minería – Gestión Pública – Legislación – PLACTED

"C*on algunas limitaciones, se puede decir que el conocimiento que tiene un país de su potencialidad en recursos minerales es proporcional al conocimiento que posee sobre sus condiciones geológicas."* (Herrera, 1965)

INTRODUCCIÓN

En el centenario del nacimiento de Amílcar Oscar Herrera buscamos recuperar una faceta de su producción política y científica, los recursos mineros, temática de amplia vigencia en la construcción de un Proyecto Nacional y Regional.

Herrera publicó sobre esta temática dos libros, donde plasma propuestas desde una perspectiva técnica cuyo correlato es la implementación de políticas de Estado soberanas; el primero, *"Recursos Minerales de América Latina"* (Herrera, 1965), y posteriormente, en el marco de la construcción del Modelo Mundial Latinoamericano (Herrera et al., 1978), escribe *"Recursos Minerales y los Límites del Crecimiento Económico"* (Herrera, 1974).

Mediante este trabajo pretendemos recuperar las líneas propuestas por Herrera, estableciendo puntos de comparación con el presente, con el objetivo de resignificar y repensar las políticas del sector minero en Argentina y América Latina. La motivación de este trabajo radica en los análisis de Herrera y nuestra experiencia personal al transitar estudios de grado en geología. De esta manera, presentamos una revisión en diferentes dimensiones sobre la educación, la producción científico-tecnológica, la legislación y el modelo de desarrollo en Argentina. En cada una de las dimensiones pusimos en consideración el contexto histórico de cada uno de los hechos y propuestas analizadas. Herrera representa una historia de ciencia y política, en la que estuvo involucrado con distintos proyectos técnico-económicos para fomentar el desarrollo de América Latina.

Nuestras ideas sobre el desarrollo latinoamericano, en línea con el Pensamiento Latinoamericano en Ciencia, Tecnología y Desarrollo (PLACTED), pretenden una *descolonización - decolonialidad* del pensar y accionar en las decisiones políticas. Herrera fue un auténtico *científico politizado* (Bilmes et al., 2019) cuyas propuestas y acciones multidimensionales en materia de recursos minerales pretenden generar mejores condiciones socio-económicas en América Latina. A partir del diagnóstico que evidencia la escasez de herramientas en la formación pública de grado para el abordaje integral del problema minero argentino, recuperamos diferentes dimensiones de análisis propuestas por Herrera (Herrera, 1965; Herrera, 1974; Herrera et al., 1978), con la intención de aportar a la reflexión y discusión sobre el modelo minero actual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como tarea principal de este trabajo se realizó un análisis de las ideas políticas fundamentales de Amílcar Herrera vinculadas a la disciplina geológica. Para evaluar la actualidad de estas ideas y los avances de la disciplina geológica en la historia argentina se analizaron datos estadísticos del sistema de educación superior público, el marco legislativo minero y educativo, datos macroeconómicos, y el registro histórico de las instituciones estatales vinculadas al sector minero en Argentina.

Las dimensiones de análisis que estructuran este trabajo (ámbito formativo y rol profesional, mapeo geológico del territorio en Argentina y América Latina, marco legislativo y aportes económico de la minería al desarrollo nacional y regional) surgen de los diagnósticos realizados por Amílcar Herrera a lo largo de su obra y en particular en su primer libro “Los recursos minerales de América Latina” (Herrera, 1965).

Las conclusiones de este trabajo, al igual que las ideas de Herrera, son de índole política e ideológica y no se alejan de un tema central de la geología, los recursos minerales. Por este motivo, las conclusiones de este trabajo son equivalentes a la discusión planteada.

DIMENSIONES DE ANÁLISIS

ÁMBITO FORMATIVO Y ROL PROFESIONAL

“Es de importancia fundamental tener en cuenta que la futura demanda de geólogos dependerá no sólo de las necesidades técnicas, sino también - y a veces en mayor medida- de la conciencia que los gobiernos y las entidades privadas tengan de esas necesidades” (Herrera, 1965).

Herrera se formó en Ciencias Geológicas en la Universidad de Buenos Aires (UBA), donde más tarde se desempeñaría como docente, dedicando largos años a la Cátedra de Yacimientos Minerales, y participando también de la gestión universitaria como Consejero Directivo en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN) de la Universidad Nacional de Buenos Aires (UBA) (Ramos, 2016). Compartió estos espacios con importantes referentes, como Rolando García, en medio de una ebullición política a nivel universitario y nacional. En 1966, luego de la Noche de los Bastones Largos, Herrera tomó parte de las renuncias masivas desatadas por la represión e intervención a la FCEyN, UBA. Sus ideas en ese entonces, fomentaban la formación de profesionales en geología para el relevamiento del territorio y de los potenciales recursos minerales de los países de América Latina.

Actualmente, en la mayoría de las universidades del país, la carrera de geología se dicta en facultades de Ciencias Exactas relacionadas a carreras de química, física e ingeniería, que excluyen de sus currículas materias de índole social, jurídica, histórica, económica y política. En Argentina la enseñanza de la geología se realiza exclusivamente en universidades públicas y sin dudas tiene un rol importante en la movilización y producción de nuestros recursos minerales y energéticos (Vallés, 2015). Las definiciones de perfiles profesionales y competencias de cada casa de estudios, así como los contenidos curriculares junto al sistema de evaluación/valoración de los antecedentes personales en concursos, muestran una tendencia clara hacia una formación de grado de carácter técnico-especialista (Lacreau, 2005). Las compañías petroleras y sus empresas asociadas de servicios reciben la mayor parte de los/as egresados/as de Ciencias Geológicas, mientras que la dedicación a estudios ambientales, tanto para municipios o estamentos provinciales y la actividad académica ocupan un porcentaje menor de los/as egresados/as. Y aunque no hay estadísticas fehacientes de la ocupación del resto de los/as egresados/as, la actividad minera local requiere gran cantidad de geólogos/as (Vallés, 2015).

Las políticas de la década 2005 - 2015 en torno a la función social y perfil profesional de los/as geólogos/as se han materializado a través de la difusión, mediatización, promoción y regulación de las competencias de la disciplina, así como la generación de puestos de trabajo para la inserción de graduados/as. En este período fueron creadas carreras de Geología en nuevas universidades nacionales como las de Tierra del Fuego, Río Negro y del Comahue, con sus respectivos centros de investigación; se fomentaron programas de becas en áreas estratégicas y de interés nacional y un conjunto de políticas vinculadas a las geociencias y el ámbito energético (Bilmes et al., 2019).

En 2008, mediante la resolución Nº 1412/2008, el Ministerio de Educación de la Nación Argentina incluyó en el régimen del artículo 43 de la Ley Nacional de Educación Superior (Ley Nº 24.521) los títulos relacionados a las Ciencias Geológicas. De esta manera, los planes de estudio y sus incumbencias son regulados por el Estado mediante la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU). Durante esos años en las facultades que dictan la carrera de geología, la problematización se centró en la revisión curricular y el alcance de estándares con el objetivo de que la carrera sea declarada de interés público (Lacreu, 2005). La resolución ministerial de 2008 propuso para las carreras afines, 40 actividades reservadas vinculadas a las actividades tradicionales, como estudios regionales, exploración, prospección de minerales e hidrocarburos, y amplía "*el campo de acción [...] con énfasis en la formación ética y la responsabilidad social y política que conllevan las acciones profesionales, así como la preservación del medio ambiente y el desarrollo sustentable."* (Resolución Nº 1412/2008).

Sin dudas, este fue un período de resignificación, valoración y desarrollo del complejo científico, y en particular de la geología mediante la articulación con diversos Núcleos Socio-Productivos Estratégicos (NSPE) contemplados en el Plan Argentina Innovadora 2020 del Ministerio de Ciencia y Técnica (MinCyT), conjuntamente con nuevos centros de investigación y fuentes de financiamiento. Se crearon universidades y posibilidades para estudiar; en consecuencia, los registros de ingresos y egresos en las carreras de Geología, Geoquímica y Geofísica aumentaron sistemáticamente en esos años (Sistema de consulta de información universitaria, 2020).

La Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, constituye un caso testigo de modificación de plan de estudio (a raíz de la resolución 1412/2008), impulsada y disputada por el claustro estudiantil, con una propuesta de inclusión de seminarios obligatorios sobre Ciencia, Tecnología y Sociedad y materias obligatorias sobre argumentación crítica, entre otras modificaciones guiadas por el perfil profesional definido y los contenidos mínimos establecidos.

En mayo de 2018, mediante la resolución 1254/2018, el Ministerio de Educación de la República Argentina modificó la Resolución Ministerial Nº 1412/2008, reemplazando el Anexo V sobre las actividades profesionales reservadas a los títulos afines. En esta medida, el Poder Ejecutivo Nacional redujo las actividades profesionales reservadas. Las nuevas definiciones aplicadas por este Ministerio excluyen palabras como *gestión*, *supervisión*, *auditorías*, *licitaciones*, *normas*, *políticas*, y sintetizan los campos de aplicación de la disciplina. Esta reducción puede interpretarse como un intento de retorno hacia formas tecnicistas, omitiendo las competencias y responsabilidades económicas, políticas, ambientales y éticas de los/as profesionales con la sociedad.

En cierto grado, la proyección de Herrera para el crecimiento de la formación en Ciencias Geológicas, se cumplió. Desde una perspectiva histórica, fue un visionario e incentivador del potencial desarrollo de la disciplina en Argentina y América Latina. Hasta el final de sus días fue un docente y un científico politizado perseverante y coherente con sus ideales, inclaudicable en su accionar. Con su ejemplo como guía, consideramos que en cada casa de estudio se debe bregar por una formación de grado crítica que contemple las competencias y los perfiles profesionales correspondientes a un/a *científico/a politizado/a* que domine las herramientas para la articulación de decisiones políticas en la gestión del territorio.

MAPEO GEOLÓGICO (MINERO) DEL TERRIOTORIO EN ARGENTINA Y AMÉRICA LATINA

"Renunciar entonces a la creación científica, una de las manifestaciones básicas de la voluntad creadora de una sociedad, para convertirse en meros apéndices intelectuales de los países adelantados, es renunciar a la posibilidad misma de un verdadero desarrollo." (Herrera, 1971)

En el año 1956 se creó la Subcomisión para Suramérica de la Comisión del Mapa Geológico del Mundo (CGMW), siendo vicepresidente el Ingeniero en minas Ruiz Fuller, quien sería en la década del '60, director del instituto de investigaciones geológicas de Chile. En Argentina, la comisión fue conformada por Angelelli, Fernández Lima, Aristarain y Herrera, y encabezada por el Dr. Tezón.

En el año 1962 Herrera fue contratado por la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) para colaborar en la confección de un documento sobre la importancia de los

recursos naturales en el desarrollo económico. En “Los Recursos Minerales de América Latina” (Herrera, 1965) presentó un inventario de los recursos minerales probados con énfasis en el estado del mapeo de la región. En esta presentación describe para Argentina y América Latina, una cartografía geológica de escaso desarrollo en kilómetros cuadrados (entre 3,5 y 10 %) a escalas de 1:200.000 y 1:250.000 (24 cartas para Argentina, en 1965) consideradas por el autor como las escalas mínimas apropiadas para los métodos tradicionales de explotación. Es notable que el registro utilizado por Herrera en sus producciones es ameno, permitiendo su comprensión a personas externas al ámbito académico.

En 1964, durante el gobierno de Arturo Illia, se creó el Instituto Nacional de Geología y Minería (INGM), dependiente de la Subsecretaría de Minería, dentro de la Secretaría de Industria y Comercio. El INGM fue pensado bajo las lógicas de funcionamiento del *United States Geological Survey* y del *Bureau des Recherches Géologiques et Minières francés*, lógicas que para el sector militar carecían del pragmatismo requerido en la prospección de materias primas necesarias para el desarrollo de la industria de defensa (SeGeMAr, 2004). Este organismo era presidido por Félix González Bonorino (quien aportaría posteriormente a la Fundación Bariloche), junto con un Consejo Asesor, integrado por Herrera y otros geólogos. En contraposición al malestar castrense, uno de los ejes centrales del INGM fue el relevamiento metalogénico nacional. En este marco, se confeccionó un primer mapa metalogénico de escala 1:2.500.000 con el fin de documentar las características de los posibles yacimientos nacionales (Angelelli et al., 1970), herramienta fundamental para inventariar los recursos, planificar su aprovechamiento económico, obras públicas, protección del ambiente, ordenanzas y gestión de territorios.

En 1996 se fundó el Servicio Geológico Minero Argentino (SeGeMAr), representando al Estado en la investigación primaria de recursos mineros de la Argentina. Se conformó mediante la fusión de dos institutos: el Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) y el Instituto Tecnológico Minero (INTEMIN).

El SeGeMAr integra el Consejo Interinstitucional de Ciencia y Tecnología (CICYT) creado en 2008 por la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación (Ley 25.467), que tiene como objetivo fortalecer el bienestar y el progreso de la sociedad de forma inclusiva y federal. Para ello trabaja en la coordinación de políticas científico-tecnológicas, y la vinculación con el sector productivo. El SeGeMAr tiene entre sus tareas examinar la estructura geológica y recursos no renovables del territorio, y ejecuta el Programa Nacional de Cartas Geológicas, el cual nos permite contar en la actualidad con 322 hojas geológicas de escala 1:100.000, 1:200.000 y 1:250.000, y 162 hojas topográficas de igual escala.

La articulación conducida desde este organismo, cuyos lineamientos iniciaron en 1956, es un claro ejemplo de la importancia de la producción de conocimientos para la instrumentación de la matriz productiva e industrial nacional y regional. Herrera impulsó la autonomía científica tecnológica, aportando a la construcción de herramientas públicas, siendo partícipe en la consolidación de estos institutos que proponían una línea de trabajo basada en el conocimiento del territorio.

MARCO LEGISLATIVO

A fin de analizar el uso de los recursos minerales, es necesario remitirse a la Constitución Nacional, el Código Minero, la Ley de Reordenamiento Minero y la Ley de Inversiones Mineras.

La Constitución Nacional presenta diferencias entre las ediciones de 1853, 1949 y 1994 que radican en la forma de concebir los recursos, la participación e injerencia del Estado en su explotación y protección, como resultado de los diferentes contextos políticos en cada reforma. Destacamos el espíritu general de la Constitución de 1949, la cual planteó un paradigma popular de administración de los bienes comunes naturales: *"La organización de la riqueza y su explotación tienen por fin el bienestar del pueblo, dentro de un orden económico conforme a los principios de la justicia social. [...] Los minerales, las caídas de agua, los yacimientos de petróleo, de carbón y de gas, y las demás fuentes naturales de energía, con excepción de los vegetales, son propiedades imprescriptibles e inalienables de la Nación, con la correspondiente participación en su producto, que se convendrá con las provincias."*

La Constitución Nacional de 1853, no contenía una regulación expresa en materia de propiedad de los recursos, ni en materia ambiental. Esta situación generó diferencias de jurisprudencia; por un lado se consideraba que la competencia ambiental pertenecía a las provincias por tratarse de una facultad no delegada a la Nación; mientras que por otro lado entendieron que era una facultad concurrente entre ambas jurisdicciones (Gago et al., 2016). Esto demostró la ineficiencia de gestión ante la falta de un régimen uniforme.

La reforma constitucional de 1994 incorporó reglamentaciones en torno al federalismo y los recursos naturales al establecer expresamente en su artículo 124 in fine, que corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio. Con ello el Estado adquirió facultades para regular el uso racional de los recursos naturales. Asimismo, el artículo 41, estableció las normas de presupuestos mínimos de protección correspondientes a la Nación, y otorgó facultades legislativas de complementación a las provincias, que deberían establecer una protección ambiental mayor pero nunca inferior a los presupuestos mínimos federales. El régimen impositivo de carácter nacional y provincial, relevante para la transformación del modelo minero actual, excede el análisis realizado en este trabajo.

La Ley de Reordenamiento Minero (Ley n° 24.224) sancionada en 1993, dispuso la ejecución del carteo geológico regular y sistemático del territorio continental, insular, plataforma submarina y antártico. De esta manera, las cartas geológicas constituyen un bien de uso público. Para garantizar la publicación y difusión de estos, la Ley de Inversiones Mineras (Ley n° 24.196) estableció que quienes ejerzan la actividad minera deberán aportar la información geológica de superficie de las áreas exploradas. En 1995 se creó el Banco de Información Geológica, dependencia orgánica y funcional de la Secretaría de Minería de la Nación, con el objetivo de relevar, procesar y estructurar una red de información pública, que permita accesibilidad ágil y eficiente a las fuentes de información geológica.

Con la creación del SeGeMAr, se estructuró de forma integral la disposición, difusión, y accesibilidad de todo el registro geológico y producciones afines con las Ciencias de la Tierra. En 2008, la sanción de la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación (Ley 25.467) permitió crear bibliotecas públicas, una de carácter nacional dependiente del IGRM, y otras de carácter provincial.

En su momento Herrera diagnosticó la escasez de información minera asociada a la falencia en el desarrollo de los servicios geológicos nacionales. Actualmente, esto no es una problemática, sino que los principales obstáculos legales están relacionados a los enfoques de los gobiernos anti-populares sobre los regímenes de propiedad y políticas impositivas, al resguardo impositivo ofrecido a las empresas de capitales extranjeros, y

al beneficio que a éstas se otorga al permitirles retener los conocimientos adquiridos durante las etapas de prospección y exploración del subsuelo.
Considerando el marco legislativo vigente, consideramos necesaria la generación de mecanismos de articulación entre los organismos que administran la información minera. Para ello, la Constitución de 1949 previamente mencionada, se constituye como un antecedente a retomar.

APORTES ECONÓMICOS DE LA MINERÍA AL DESARROLLO NACIONAL Y REGIONAL

Herrera se abocó, en conjunto con otras/os integrantes de la Fundación Bariloche y PLACTED como Jorge Sábato, a la construcción del Modelo Mundial Latinoamericano (Herrera et al., 1978). Este plantea un modelo de sociedad ideal (esencialmente bajo un modelo político socialista) expresado en un modelo matemático económico y de sistema productivo para las diferentes regiones o bloques mundiales. En base a las diferencias entre países desarrollados y subdesarrollados el Modelo Mundial Latinoamericano (MML) pretende demostrar que no existen limitaciones materiales o físicas (principalmente en recursos minerales, energéticos, y de sustentabilidad ambiental) para lograr el bienestar social mundial, sino que las limitaciones radican en posiciones y decisiones socio-políticas.
La perspectiva PLACTED analiza la dependencia cultural, científica y tecnológica de los países periféricos, además de la dependencia económica establecida en el rol histórico de América Latina como productora y exportadora de materias primas. En este sentido, el objetivo prioritario del sistema productivo propuesto es la satisfacción de las necesidades humanas básicas, definidas por los/as autores/as del MML en la alimentación, la vivienda, la educación y la salud, donde la complementación económica regional juega un papel irremplazable en el desarrollo autónomo y que es favorecida por la continuidad geográfica entre países que comparten condiciones económicas iniciales similares para el modelo.
Desde una perspectiva geológica y con el fin de lograr un lenguaje común que habilite discusiones realmente democráticas, queremos destacar el marco de análisis de los límites físicos al desarrollo propuesto por Herrera. Ante la centralidad puesta en los *recursos naturales no renovable*s como condicionantes del desarrollo económico mundial Herrera plantea reiteradamente la necesidad de diferenciar entre recursos y reservas minerales. En pocas palabras, los *recursos* corresponden a las acumulaciones geológicas de minerales de interés, mientras que las *reservas* se definen en función de la factibilidad técnica y económica de extraer ese mineral en un futuro previsible.

> *"Es obvio que la previsión de esas condiciones (económicas y técnicas) implica que el evaluador debe adoptar decisiones arbitrarias, en el sentido de que se basan, en gran medida, en sus opiniones personales. Así se explica que las estimaciones de la riqueza minera de una misma región, realizadas por distintas personas, dan muchas veces resultados considerablemente discrepantes entre sí."* (Herrera et al., 1978)

Entonces, considerando las reservas definidas en función de variables técnicas y económicas, y dado que históricamente aumentaron al ritmo de la expansión de fronteras exploratorias y el desarrollo tecnológico, pueden desarticularse los argumentos que sustentan un modelo de desarrollo que, en la segunda mitad del siglo XX y desde

los países centrales, propuso límites físicos al crecimiento económico y el bienestar social de los países periféricos.

Retomando los postulados de Herrera, consideramos que es necesario incorporar al sector minero a la construcción del *estilo de desarrollo* que pretendemos asumir para la reconfiguración de la región, dado que el continente posee abundantes recursos naturales, explotados en mayor o menor escala en cada nación, en función de su economía y sus características geológicas. Según datos del Banco Mundial, en el año 2017, Chile registró un aporte al PBI del 8,1%; en Perú para el mismo año la minería tuvo un impacto del 10%, mientras que en Bolivia alcanzó el 4,33%. El caso de Argentina es diferente, ya que históricamente la actividad fue baja. En 2002 el aporte al país fue del 0,7%, en 2006 el registro subió al 1,1%. Las dos mediciones siguientes marcaron una baja pronunciada, pues en 2013 y 2017 el aporte de la minería al PBI fue del 0,5%. Es importante destacar que el PBI no es un indicador claro de la situación socioeconómica de la población. Sumado a ello, el crecimiento económico impulsado por la megaminería metalífera ejercida por capitales transnacionales, no representa una relación directa respecto al desarrollo soberano de los pueblos.

La manipulación mediática abona a la homogeneización de la actividad y desprecia la existencia de proyectos mineros de menor escala que utilizan técnicas diferentes a las de la minería metalífera (comúnmente llamada megaminería). Con mayor gravedad aún, invisibiliza los reclamos territoriales y ambientales de las comunidades locales, impidiendo que se garantice el acceso a la información, al conocimiento sobre los recursos y reservas, a la licencia social, la consulta popular, y la posibilidad de desarrollar las economías regionales.

Actualmente, la polarización pro y anti minera constituye una disyuntiva falaz entre intereses económicos e intereses de índole ambiental-territorial. Esta discusión, hábilmente cooptada por el lobby minero y por el ambientalismo corporativo, abona a la dependencia cultural, tecnológica y económica, dejando de lado el urgente debate popular para lograr consensos en materia de recursos minerales.

DISCUSIÓN

A partir de las ideas y acciones de Herrera expuestas en este trabajo, emerge la posibilidad de reivindicar y reformular ciertos lineamientos, así como la posibilidad de construir nuevas maneras de pensar y hacer minería. Argentina y la región latinoamericana requieren una planificación cuidadosa que articule la educación superior, la inserción laboral en espacios de gestión pública, y la decisión de implementar políticas de Estado que ubiquen a la minería como una posible herramienta para la independencia económica y el bienestar social. Creemos que en este camino, es necesario establecer una política centralizada que plantee criterios homogéneos para todo el territorio nacional continental y marino. La provincialización de la propiedad de los recursos no garantiza el carácter federal de la Nación, sino que repercute de forma negativa en la distribución de las riquezas y obstaculiza la producción y la regulación de la actividad minera.

Para abordar las problemáticas educativas planteadas previamente, se deberían reformular los planes de estudio de las carreras vinculadas a las geociencias, de manera que se incluyan herramientas para la construcción de políticas públicas, conceptos generales de economía y derecho, todo ello desde perspectivas críticas y situadas. En otras palabras, apuntalar la formación superior pública de *científicos/as politizados/as*. En cuanto a las instituciones, proponemos ampliar y vigorizar su composición con

científicos/as politizados/as que imbuyan de nuevos aires a la gestión pública, para lo que deberán implementarse estrategias de inserción de jóvenes graduados/as, buscando superar la vieja tradición del *"derecho de piso"*.

A fin de enriquecer las discusiones democráticas, uno de los ejes a trabajar es el ámbito educativo obligatorio, ya que al incluir en la formación ciudadana nociones sobre geografía y geología, abonaremos a que las futuras generaciones incorporen a su construcción identitaria la apropiación del territorio nacional y sus bienes comunes. Secundariamente, se facilitará la interpretación de la información de libre acceso, disponible en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) del SeGeMAr, del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de la Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CoNAE), cuyas plataformas permiten conocer con distintos niveles de detalle las características físicas de nuestro territorio.

Nuestro país es posicionado por el discurso hegemónico como productor de materias primas dependiente de las demandas del mercado internacional. Para encaminarnos hacia un futuro distinto es necesario repensar el modelo productivo, que en materia de recursos minerales fue orientado hacia el oligopolio transnacional mediante la reforma del Código Minero de los ´90. Entendemos que la explotación racional y sustentable de los recursos minerales permitirá generar puestos de trabajo digno y estable, incluir en la matriz productiva a sectores excluidos, incrementar la infraestructura de poblados, y aumentar el ingreso de divisas. Si tomamos en consideración el sector tecnológico nacional vinculado con la producción primaria estaríamos en condiciones de sostener la extracción racional de algunos recursos otorgándoles valor agregado.

Durante los gobiernos anti-populares, observamos una tendencia a omitir o sintetizar en la legislación algunos aspectos que, al no regularse, favorecen a sectores de poder concentrado. Como ejemplos de una tradición liberal, la Constitución de 1853 no se expide sobre el derecho de propiedad del recurso minero, así como la reducción de las competencias de los/as geólogos/as en 2018 conduce a un perfil técnico de la disciplina. En contraposición, la Constitución de 1949, y las políticas durante los gobiernos de Néstor Kirchner (2003 - 2007) y Cristina Fernández (2007 - 2015), muestran una intención de conjugar el uso de los recursos minerales con el rol social de los/as geólogos/as, en vistas de acercarnos a un modelo productivo nacional, sustentable y con compromiso ético y político profesional.

Por otro lado, frente a los obstáculos en la construcción de consensos sociales, creemos necesaria la correcta aplicación de la licencia social establecida por la legislación del ´94, mediante consultas populares y evaluaciones de impacto ambiental transparentes. Es inminente la incorporación de los conflictos socio-ambientales en las políticas públicas, para que progresivamente revelen la preponderancia que las decisiones políticas deben tener sobre los intereses económicos concentrados. La legislación vigente, más allá de su posible reforma, no puede constituir una excusa a la hora de ejercer la gestión pública. El MML propuso redefinir el concepto de propiedad hacia un concepto de gestión de los recursos minerales, que trabaje en función del bienestar social y las necesidades básicas (Herrera et al., 1978). El marco legal es un signo de época y, como tal, debe responder a las actuales demandas populares adecuándose a un proyecto de país soberano.

Las necesidades sociales básicas contempladas en el MML, en muchos casos, aún están en disputa. Como ejemplos, la lucha feminista y la lucha de las comunidades originarias, han expresado la necesidad de conquistar nuevos derechos que garanticen el bien común. En este mismo sentido, el contexto de la pandemia reveló vulnerabilidades y demandas sociales que exigen un acceso igualitario a las tecnologías de la

información y la comunicación (TIC). El Decreto Nacional de Urgencia 690, publicado en agosto de 2020, es un ejemplo de accionar político que declara como servicio público esencial a las TIC, y las incorpora a un proyecto de desarrollo con inclusión y justicia social. Muchas de las necesidades emergentes (vivienda, tecnología, salud, entre otras) están vinculadas a la producción minera, hidrocarburífera y energética.

Desde el campo nacional y popular, debemos ubicar en la agenda pública un debate ciudadano nutritivo que nos permita establecer proyecciones, marcos normativos, y un horizonte político colectivo. En este horizonte, también deberá incluirse un debate regional, que abone a la reconstrucción de la integración latinoamericana.

Por último, y no por ello menos importante, volvemos a destacar la relevancia y vigencia de Amílcar Oscar Herrera. Pretendemos que su memoria se mantenga viva en cada militante popular, en cada docente comprometido/a con la realidad, en cada científico/a militante, en cada funcionario/a público/a que gestione priorizando el bienestar de los pueblos. Esperamos que la semilla plantada durante tantos años por él y por otras/os que pensaron y actuaron en consecuencia, siga floreciendo en generaciones politizadas y comprometidas con la Patria Grande.

REFERENCIAS

Angelelli, V., Fernández Lima, J.C., Herrera, A. y L Aristarain, (1970). Descripción del Mapa Metalogenético de la República Argentina. Minerales Metalíferos. Anales XV, 186 p. Buenos Aires, Dirección Nacional de Geología y Minería

Argentina Innovadora 2020, Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Lineamientos estratégicos 2012-2015. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pai2020.pdf

Banco Mundial, Data Bank, Renta Minera (% del PBI). https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MINR.RT.ZS?locations=AR

Bilmes, G., Carrera, J., Andrini, L. & Liaudat, S. (2019). Ética, ciencia y compromiso político. Opciones y alternativas desarrolladas por científicos/as sensibles a los problemas sociales.

Constitución Nacional Argentina, 1853, 1949 y 1994

Decreto 690/2020, Argentina Digital

Gago M.E, Gómez Zavaglia T., Rivas F. (2016). Federalismo Ambiental: los recursos naturales y la distribución de competencias legislativas en la Constitución Nacional Argentina

Herrera, A.O., (1965). Recursos Minerales de América Latina, EUDEBA

Herrera, A.O., (1971). Ciencia y política en América Latina.-1a edición-Buenos Aires: Biblioteca Nacional.

Herrera, A.O., (1974). Los recursos minerales y los límites del crecimiento económico. Siglo XXI Editores S.A.

Herrera, A.O., Scolnik, H.D. & Chichilnisky, G., Gallopin, G.C., Hardoy, J.E., Mosovich, D., Oteiza, E., de Romero Brest, G.L., Suárez, C.E. & Talavera, L. (1978) ¿Catástrofe o nueva sociedad?: Modelo Mundial Latinoamericano. Bogotá. ISBN: 0889361452.

Lacreu, H. L., (2005). El perfil del geólogo, XVI CGA (Congreso Geológico Argentino) La Plata, 2005

Ley N° 1919. Código de Minería. http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/40000-44999/43797/texact.htm

Ley 24.196. Inversiones Mineras. http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/594/texact.htm

Ley n° 24.224. Ley de Reordenamiento Minero. http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/623/norma.htm

Ley Nº 24.521. Ley nacional de Educación Superior. http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/25000-29999/25394/texact.htm

Ley 25.467. Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación. https://www.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/Ley-25.467-CIENCIA-TECNOLOGIA-E-INNOVACION1.pdf

Ramos, V. La larga jornada. Revista La Ménsula, (Abril 2016). Año 9, N°22 Programa de Historia de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Secretaría de Extensión Graduados y Bienestar

Resolución 1412 / 2008. https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1412-2008-147297

Resolución 1254/2018 (Artículo 28 - Anexo XXV). https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/183989/20180518

Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, (1999). Programa Nacional de Cartas Geológicas y Temáticas de la República Argentina - Normativa para las Cartas Minero-Matalogenéticas de la República Argentina

Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, (2004). Historia de la Minería Argentina. Anales XL. Tomo I, páginas 200 y 201. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales

Sistema de consulta de estadísticas universitarias (SCEU). Secretaría de Políticas Universitarias. Presidencia de la Nación. http://estadisticasuniversitarias.me.gov.ar/#/home

Svampa, M. & Viale, E. (2014). Maldesarrollo: La Argentina del extractivismo y el despojo. Katz editores.

Vallés, E. (2015). Estado y perspectivas de las ciencias exactas, físicas y naturales en la Argentina. Academia Nacional de Ciencias.

ANÁLISIS DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL SEGÚN LA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE DEL SUELO EN UNA CUENCA SERRANA BONAERENSE

Guzmán Guaraca A[a], Gaspari F. J.[b] y de Antueno L.[b]

[a] *Becario Doctoral CICPBA - CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*
[b] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

El sistema serrano de Ventania es considerado la principal fuente de recarga del sistema hidrológico del Sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Sin embargo, la problemática es el avance de la agricultura y ganadería sobre zonas con pendiente escarpada, provocando la perdida de la vegetación natural principalmente pastizales nativos. Ello supondría un importante riesgo de erosión hídrica, que su zonificación es el objetivo del presente trabajo. Se analizaron los registros de precipitación diaria en los últimos 10 años, para definir los escenarios en la cuenca de estudio e identificar la ocurrencia de las 3 condiciones de humedad antecedente del suelo. Se zonificó el riesgo de erosión hídrica superficial en la Cuenca Alta del Río Sauce Chico para el año 2018, mediante el cruzamiento del número de curva (NC) y pendiente en porcentaje (%), a través del software QGIS ©. Existe una prevalencia de la condición 1 de un 50,8 %, pero al mismo tiempo existen tormentas mayores a 38,1mm que se producen bajo condición 1 (<12,7 mm), de ahí que la clase de riesgo de erosión muy baja represente el 49.25% de la superficie. En la condición de humedad III (>38,1mm) el 42,66% de la superficie presenta un nivel de riesgo medio. Se concluye en la cuenca serrana en estudio, de clima semiárido, la condición de humedad antecedente genera más riesgo de erosión que la pendiente.

Palabras Clave: Cuenca hidrográfica, Riesgo de erosión hídrica, NC, Condición de humedad antecedente.

INTRODUCCIÓN

Al inicio de un evento de precipitación, una parte es retenida por la vegetación que la intercepta, otra infiltra dependiendo de la capacidad de saturación del suelo y finalmente, si el volumen o intensidad de la precipitación sobrepasa estos límites, empieza la generación de escurrimiento. El flujo de agua de lluvia que conforma el escurrimiento circula de forma laminar en movimientos cuasi horizontales, ya sea sobre la superficie del suelo o a nivel de subsuelo, ayudando a mantener los ríos y lagos por largos periodos de tiempo (Gaspari, Rodrìguez, Senisterra, Delgado, & Besteiro, 2013).

Cuando el flujo de escurrimiento es sobre la superficie del suelo se conoce como escurrimiento superficial y tiende a ser el principal responsable de cambiar los contornos y formas del relieve a través de la activación de procesos de erosión.

Una forma de cuantificar el escurrimiento superficial es mediante el método del Número de Curva (NC), establecido en 1954 por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USDA) (Ponce & Hawkins, 1997). Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación, que por diferencia permite determinar la escorrentía directa en pequeñas cuencas agrícolas (Ares, Chagas, & Varni, 2012). El NC debe ser establecido para cada complejo suelo-vegetación, a partir de características particulares de vegetación, textura y condiciones de humedad antecedente (AMC). Este último parámetro ajusta los valores de NC, dependiendo si la condición de humedad es seca (AMC I), normal (AMC II) o húmeda (AMC III) (Ponce & Hawkins, 1997).

La cuenca serrana del Río Sauces Chico es muy importante como zona de recarga principal, debido a altos volúmenes de escurrimiento que se generan al presentar abundante roca aflorante en zonas de pendiente escarpada. A esta condición natural se suma el avance de la agricultura y ganadería sobre zonas de vegetación natural principalmente en zonas inter-serranas. Ello supondría un importante riesgo de erosión hídrica potenciado por lluvias de corta duración, generan escorrentías que pueden formar grandes avenidas. Algunos de estos eventos producen inundaciones de corta duración, pero de gran intensidad, provocando daños a la propiedad pública y privada (Torrero, 2009; FUNS, 2011; TBB, 27/02/13; LNP, 31/10/14).

El objetivo del presente trabajo fue zonificar el riesgo de erosión hídrica para el año 2018 a partir del NC y topografía del área, considerando las 3 condiciones de humedad antecedente, a partir de registros de precipitación diaria en los últimos 10 años.

MÉTODOS

El área de estudio se localiza en la región pampeana del suroeste de la Provincia de Buenos Aires. Comprende la cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH), presenta una pendiente entre 0,5 y >18%. Se extiende por los partidos de Saavedra, Tornquist y Coronel Suarez. El curso principal recibe el aporte de varios arroyos secundarios: Chaco, Barril, Ventana y San Juan que drenan los faldeos de los cordones serranos Curamalal, Bravard y Ventana (Gaspari, 2007; Torrero, 2009; FUNS, 2011). Los principales tipos de suelo presentes son Haplustoles y Argiudoles.

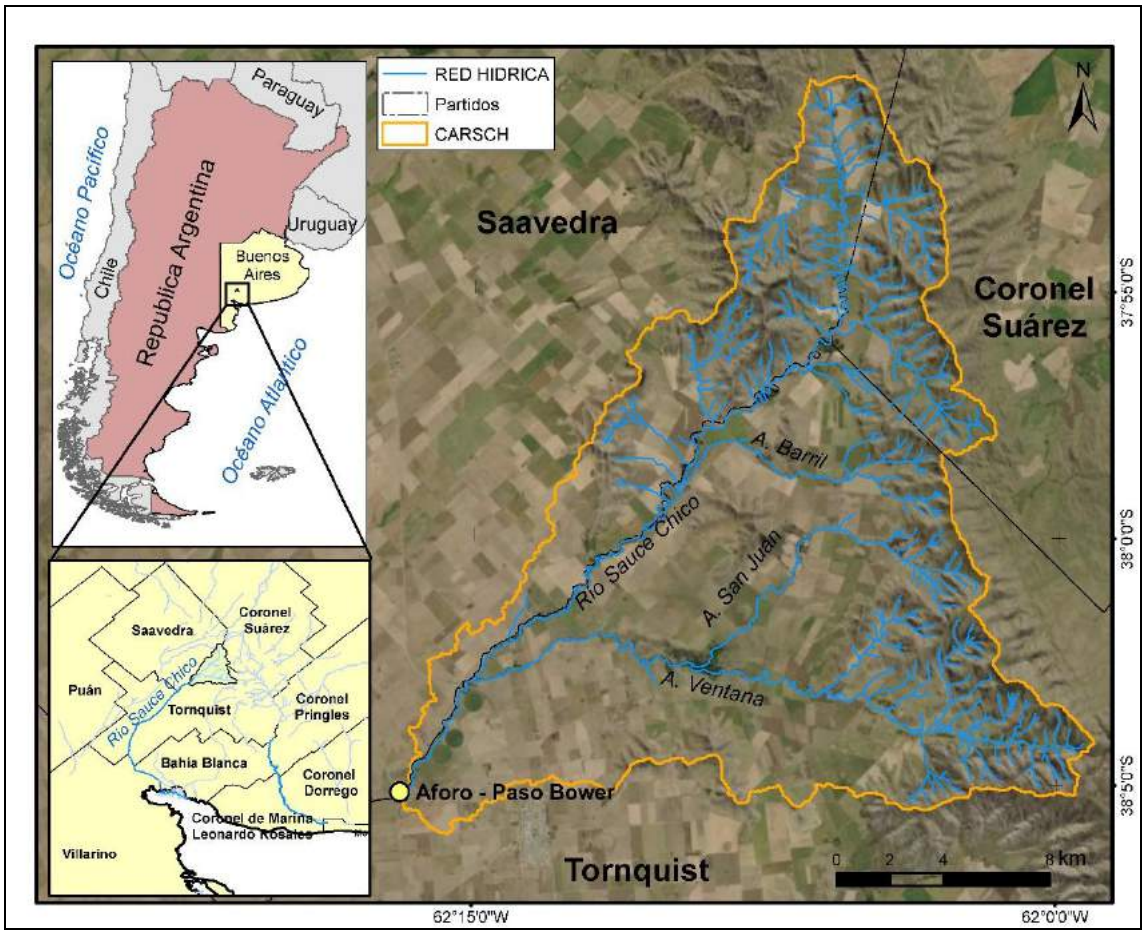


Figura 1. Ubicación de la Cuenca alta del río Sauce Chico. Argentina. Fuente: de Antueno et al, 2020

La precipitación media anual durante el periodo 2009-2018 fue de 811,08 mm, dato que corresponde a la estación meteorológica perteneciente a la Fundación Hogar FUNKE, Tornquist, que es la estación más cercana al área con datos completos.

Para determinar el NC se elaboraron mapas que caracterizan cada complejo suelo-vegetación, que fueron superpuestos en un SIG y a las distintas combinaciones se designó un valor de NC, de acuerdo con las tablas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para AMC II (Ponce & Hawkins, 1997).

Los mapas elaborados proporcionan la siguiente información:

a) Para la realizar la caracterización edáfica de CARSCH, se hizo uso de la carta de suelos en escala 1:50 000, formato shape file, suministrado por el Instituto de Suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2018) y la descripción de los grupos edáficos que se encuentran disponibles en la página http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.html. Esta caracterización se refiere a series de suelo, permeabilidad y grupo hidrológico (GH).

b) Uso y cobertura de suelo. Para la identificación espacio-temporal de los principales usos de suelo en la CARSCH se empleó la plataforma de acceso libre Google Earth Engine. Se aplicó una clasificación supervisada mediante el

algoritmo Random forest (RF), considerado como el óptimo por revisión bibliográfica y pruebas realizadas anteriormente frente a otros clasificadores. Las imágenes utilizadas fueron de la colección LANDSAT 8 OLI, calibradas a tope de la atmosfera y adquiridas entre los meses de mayo – julio que se corresponde con los meses más secos y de menor cobertura nubosa. Para incrementar la separabilidad de clases se utilizó el modelo de elevación digital (SRTM) y el índice espectral NDVI.

De acuerdo con los expresado por Gaspari et al. (2009) referente de la clasificación de humedad antecedente del suelo en base a la precipitación acumulada de 5 días previos a un evento de precipitación (AMC I y III), se ajustaron los NC de la condición II mediante las Ec. (1) y (2):

$$NC\,I = \frac{4{,}2\,NCII}{10 - 0{,}058\,CNII} \qquad (1)$$

$$NC\,III = \frac{23\,NCII}{10 - 0{,}13\,NCII} \qquad (2)$$

Obtenida la zonificación del NC, se procedió al cruzamiento del mapa de rangos de NC con el mapa de rangos de pendiente. Una vez generado el mapa de cruzamiento se identificaron las diferentes clases de riesgo de erosión con base en la clasificación propuesta por Gaspari et al. (2013) y expresada en la Tabla I.

Tabla I: Riesgo de erosión según complejo suelo-vegetación (NC) y pendiente.

Rango Pendiente %	**Rango de NC**					
	< 30	**30-45**	**45-60**	**60 - 70**	**70-80**	**>80**
0 – 3	**MB**					**B**
3 – 12	**MB**			**B**		**M**
12 - 18	**B**			**M**		
18 - 24	**M**			**A**		**MA**
24 - 30	**A**					**MA**
>30	**MA**					

*MB: muy bajo, B: bajo, M: medio, A: alto, MA: muy alto

Fuente: Gaspari et al. (2013)

 ISBN 978-987-1323-66-1

RESULTADOS

En los registros de precipitación diaria de la estación meteorológica Fundación FUNKE, se observaron 272 eventos de precipitación, de los cuales el 64,7% se desarrolló bajo AMC I, el 24,26% corresponden a AMC II y el 11% a AMC III.

La Fig. 2 muestra los factores que intervienen en el riesgo de erosión hídrica superficial. El uso del suelo que predomina en el área de estudio es de tipo agropecuario, con una superficie de ocupación del 51,3%, el cual se desarrolla, principalmente, sobre suelos con pendiente < 12% de GH A, B y C de infiltración alta a lenta. La cobertura natural, representada por pastizal natural con roca y pastizal serrano, se encuentra bajo presión por actividades agrícolas y crecimiento de áreas semi urbanas, por lo que ha quedado relegada a zonas con relieve fuerte a escarpado (12% >), donde dominan suelos de GH D de muy baja infiltración y, en las zonas peri e intraserranas, de GH B, considerado de filtración moderada.

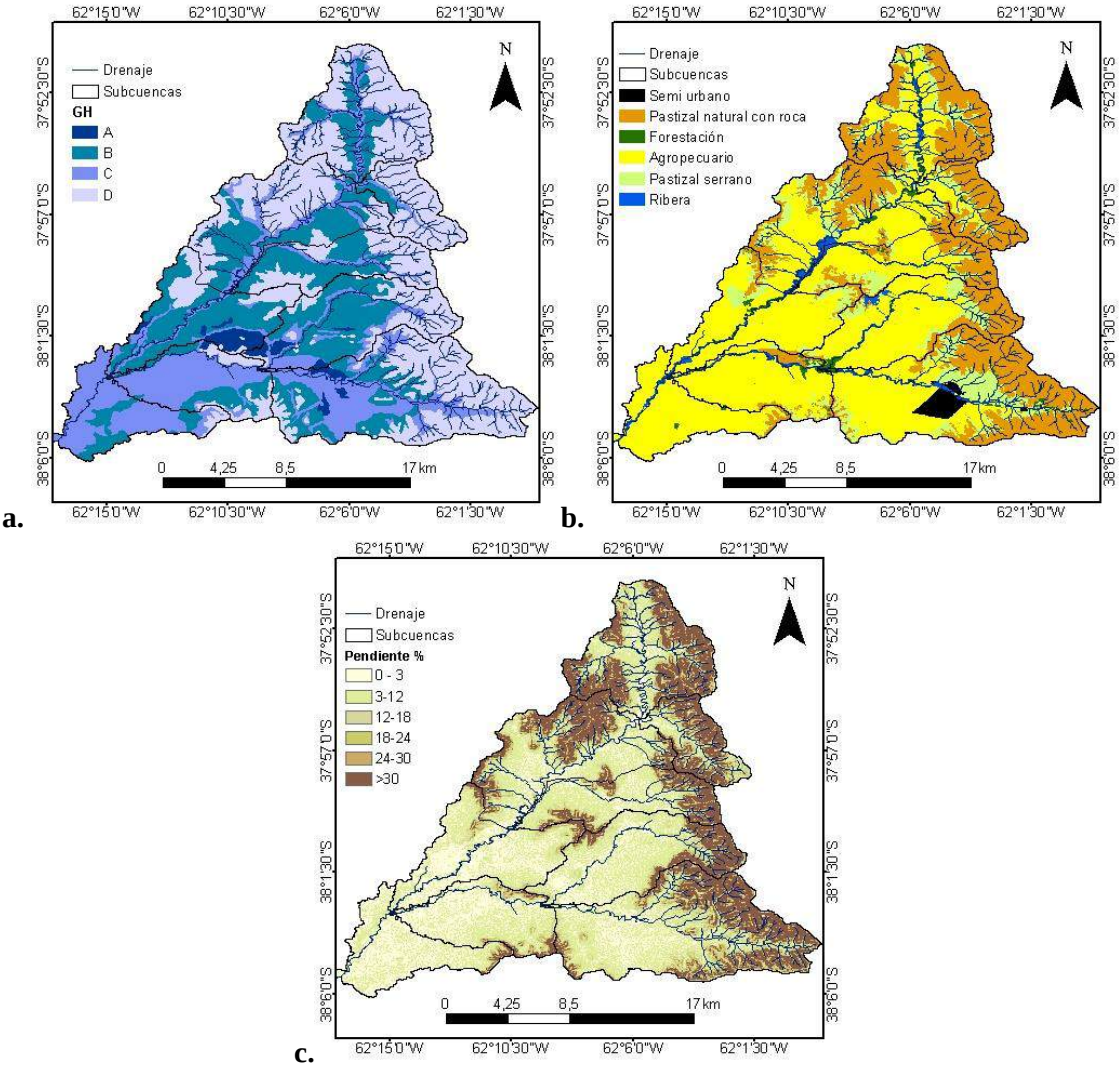


Figura 2. a. Grupo hidrológico (GH). **b.** Cobertura y/o uso de suelo**. c.** Rangos de pendiente.

Las condiciones de infiltración – escorrentía representadas por el mapa de GH, cobertura y/o uso de suelo y su procesamiento permitió determinar el NC para las tres condiciones de humedad antecedente (ver Fig. 3). En condición seca (AMC I) se aprecia la heterogeneidad de la distribución de las unidades cartográficas en el paisaje, es así que el rango de variación es 66 con un valor máximo de 81 y un mínimo de 15, en promedio el NC del área de estudio es de 64. En condición normal (AMC II), existe un incremento en el número de curva ya que el mínimo fue 30 y el máximo 91, la variabilidad ha disminuido ligeramente ya que el rango de variación es 61, el valor promedio para yoda la cuenca fue de 80. En condición húmeda (AMC III) gran parte del área de estudio tiene un NC mayor a 60, los valores de NC varían entre 50 y 96 y el promedio para toda el área es 90.

En las tres condiciones de humedad, las áreas de baja pendiente, destinadas a actividades agrícolas son las que presentan un notable incremento en el NC; mientras que las áreas de relieve escarpado muestran menor variabilidad, especialmente al cambiar de condición normal a húmeda.

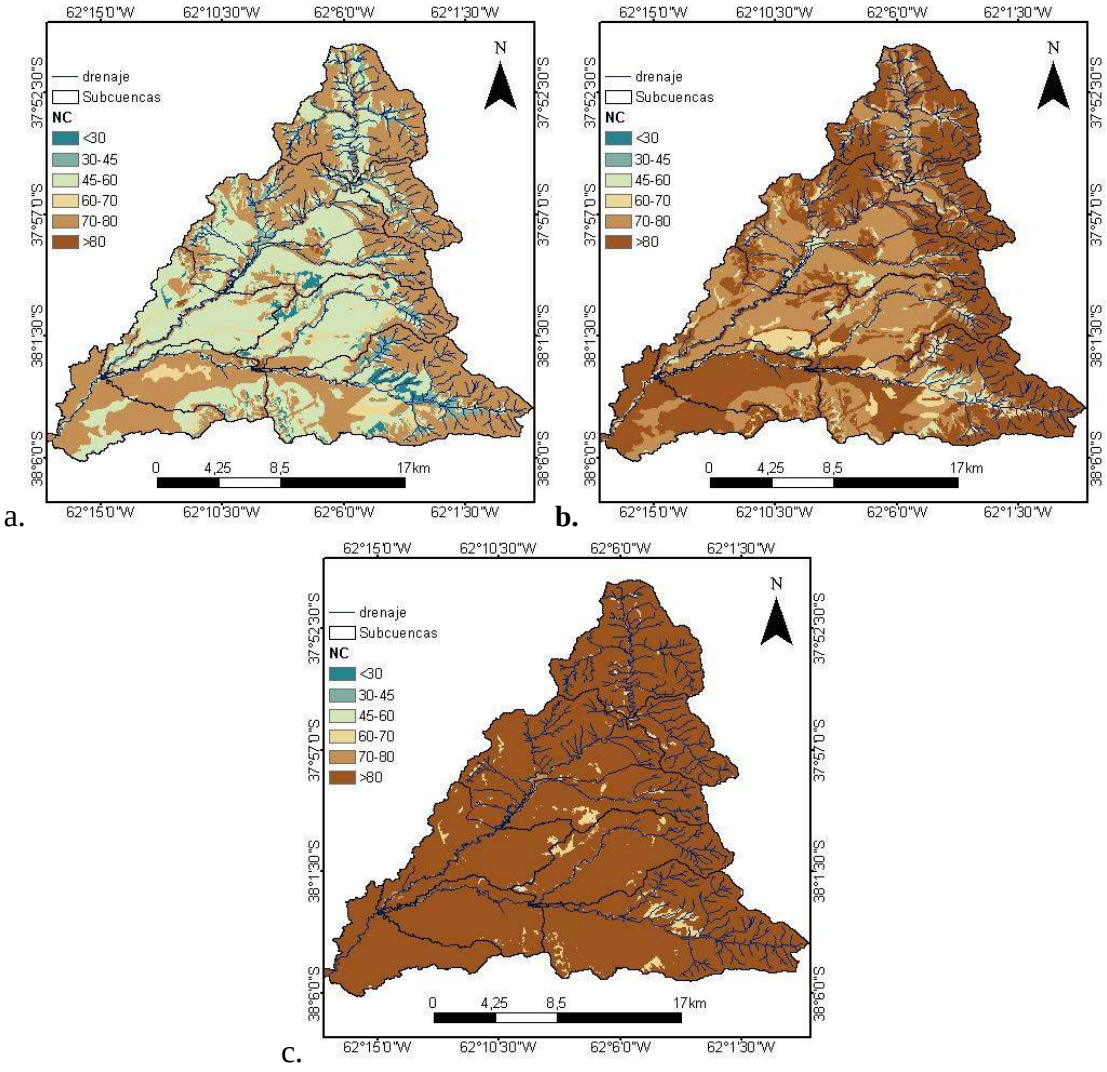


Figura 3. a. NC para AMC I; **b.** NC para AMC II**; c.** NC para AMC III.

La Figura 4, zonifica el riesgo de erosión hídrica considerando el efecto de factores físicos-ambientales, como el tipo de suelo, las prácticas de cultivo y manejo de la tierra expresados por el NC, y la distribución de pendientes sobre la cantidad de escorrentía generada por una tormenta.

La distribución del riesgo de erosión hídrica al cambiar las condiciones de humedad antecedente muestra que las zonas serranas de pendiente escarpada mantienen un muy alto gradiente de riesgo, independientemente de la condición de humedad edáfica.

El principal cambio se observa en áreas con relieve menor a 24% de pendiente, donde a medida que aumenta la humedad acumulada en la cuenca, se incrementa el riesgo de erosión hídrica, con tendencia a nivel medio en la condición III.

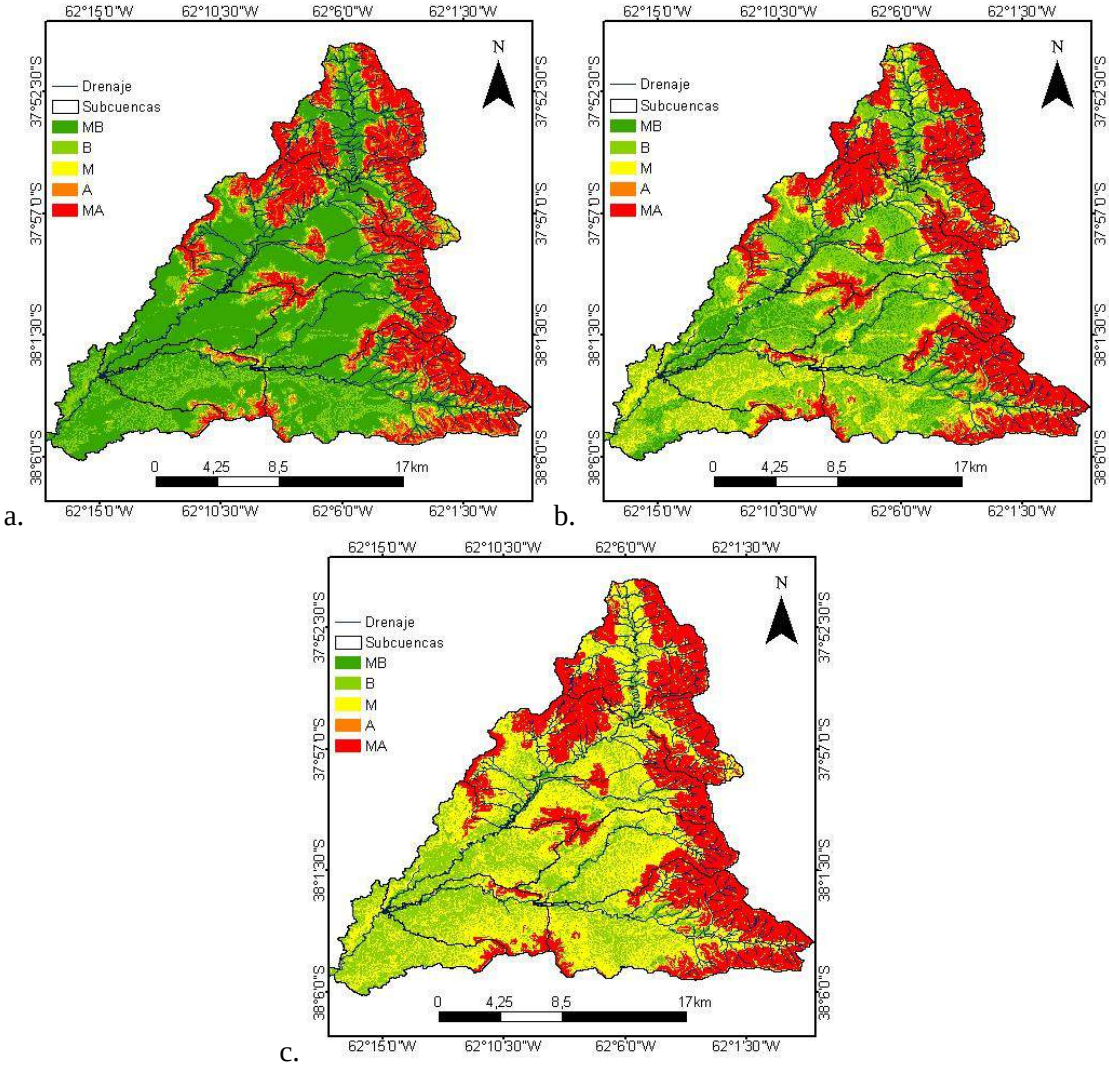


Figura 4. a. Riesgo de erosión AMC I; **b**. Riesgo de erosión AMC II; **c**. Riesgo de erosión AMC III.

La Tabla II muestra la variación de la superficie de los distintos niveles de riesgo de erosión en función de las condiciones de humedad antecedente. Como se expresó anteriormente la categoría muy alta presenta un ligero crecimiento en superficie (8%),

mientras que las categorías muy baja y baja disminuyen significativamente y se transforman en áreas con riesgo medio principalmente.

Tabla II: Superficie de ocupación del riesgo de erosión según condición de humedad antecedente.

			Riesgo de erosión				
	Condición de humedad	**Unidad**	**Muy baja (MB)**	**Baja (B)**	**Media (M)**	**Alta (A)**	**Muy alta (MA)**
Superficie de ocupación	I	**km²**	**179,64**	**60,43**	**18,10**	**27,60**	**78,94**
		%	**49,25**	**16,57**	**4,96**	**7,57**	**21,64**
	II	**km²**	**57,72**	**124,54**	**69,68**	**10,53**	**102,28**
		%	**15,83**	**34,15**	**19,11**	**2,89**	**28,04**
	III	**km²**	**3,22**	**92,52**	**155,58**	**0,99**	**112,40**
		%	**0,88**	**25,37**	**42,66**	**0,27**	**30,82**

CONCLUSIÓN

En la cuenca alta del rio Sauce Chico la topografía configura el funcionamiento del área. Las zonas de elevada pendiente (mayor a 24%) tienen muy alto riesgo de erosión hídrica independientemente de las condiciones de humedad antecedente que presenta el suelo al momento de un evento pluvial. Este escurrimiento generado es acumulado o receptado por zonas de menor pendiente, principalmente la zona media de la cuenca. Esta situación genera que el riesgo de erosión en esta zona, en condiciones de AMC I, sea bajo y que, a medida que existe acumulación de humedad, se incremente el riesgo a un nivel medio.

En este tipo de escenarios de AMC es importante el rol del complejo suelo-vegetación, que a través de su manejo y ordenamiento pueden ayudar a disminuir los efectos de la configuración natural de la cuenca.

También se debe considerar que la variabilidad pluvial, propia de una cuenca semiárida, marca los diferentes grados de riesgo de erosión hídrica y que conocer el efecto de la condición de humedad antecedente permite mejorar la predicción del escurrimiento. Además, la metodología geoespacial implementada en este trabajo complementa la detección de zonas vulnerables a la erosión hídrica superficial.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Ares, M. G., Chagas, C., & Varni, M. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia Del Suelo*, *30*(2), 151–160 (2012).

De Antueno, L., Gaspari1 F. and Guzmán Guaraca A. Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista estudios ambientales*. 8:20-42. (2020).

Fundación de la Universidad Nacional del Sur FUNS. *Prefactibilidad de sistematizacion y aprovechamiento de la cuenca del rio Sauce Chico* (2011).

Gaspari, F. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.)* (Universidad Internacional de Andalucía sede Iberoamericana Santa María de la Rábida). Retrieved from https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/59/0031_Gaspari.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gaspari, F.J.; G.E. Senisterra; M.I. Delgado; A.M. Rodríguez Vagaría y S.I. Besteiro.. *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.* 1ª ed., ISBN 978- 987-05-6165-1. La Plata. 321 p (2009).

Gaspari, F., Rodrìguez, A., Senisterra, G., Delgado, I., & Besteiro, S. *Elementos metodològicos para el manejo de cuencas hidrogràficas* (Primera ed). Editorial de la Universidad Nacional de la Plata (2013).

Ferrér, M., Rodríguez, J. & Estrela, T. Generación automática del Número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4),45. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/39431260_Generacion_automatica_del_numero_de_curva_con_sistemas_de_informacion_geografica (1995).

Frangi, J. & Bottino, O. Comunidades Vegetales de Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Plata*, 71(1), 93-113 (1995).

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. *Cartas de suelos de la Provincia de Buenos Aires.* Recuperado de http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm (2018).

La Nueva Provincia LNP. *"El agua bajaba con una fuerza impresionante", dijo un productor de Cerri*. Recuperado de https://www.lanueva.com/nota/2014-10-31-0-59-0--el-agua-bajaba-con-una-fuerza-impresionante-dijo-un-productor-de-cerri (31/10/14).

Ponce, V., & Hawkins, R. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, *2*(3), 145–148. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:3(145) (1997).

Torrero, M. P. *Río Sauce Chico: estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable*. Universidad Nacional del Sur (2009).

Telefe Bahía Blanca TBB. Cerri, *inundación del arroyo Sauce Chico en 1973*. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=bxFJn0FoyfI (27/02/13).

COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DE PLOMO POR BIOMASA FÚNGICA, BENTONITA Y CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL

Hidalgo N. A.[a], Bustos D. A.[b], Mamanì A.[c,d] y Bustos D. [a,b]

[a]*Instituto de Investigaciones Mineras, FI, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA*
[b]*Instituto de Cienicas Basicas, ICB-UNSJ, Universidad Nacional de Sa Juan, ARGENTINA*
[c]*Instituto de Ingenieria Quimica, IIQ-FI,Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA*
[d]*CONICET, Godoy Cruz 2290, C.P. C1425FQB, Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: nhidalgo@unsj.edu.ar

RESUMEN

Existen numerosos métodos físicos y químicos para el tratamiento y la remoción de metales pesados de soluciones acuosas. Entre las metodologías una de las más utilizadas es la técnica de adsorción, por su gran versatilidad y debido a la permanente generación de nuevos materiales adsorbentes con excelentes propiedades. Gran cantidad de materiales biológicos han sido estudiados con el fin de evaluar su potencial para adsorber metales pesados. Entre estos materiales la biomasa bacteriana, hongos y algas marinas, constituyen el conjunto más estudiado hasta el momento. Generalmente, los adsorbentes utilizados tienen alta porosidad, elevada superficie específica y grupos funcionales cargados para fijar los iones disueltos. Las vías de activación de adsorbentes son la química y la térmica, o una combinación de ambas. El objetivo de este trabajo fue la activación de biomasa de origen fúngico (Penicillium cluniae) aislada a partir de desechos mineros, bentonita y carbón para su posterior evaluación como adsorbentes de Pb (II) por medio de ensayos de adsorción. Estos ensayos se llevaron a cabo a través de un estudio combinado de pH, concentración de biomasa, concentración metálica y tiempo, mediante el desarrollo de un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR), que como respuesta tuvo la capacidad de adsorción. A partir del cual se pudo obtener un modelo cuadrático y se encontró la mejor combinación de factores para maximizar respuestas. Como estudio complementario se analizaron imágenes de microscopía electrónica para determinar la presencia del metal adsorbido. Las capacidades de adsorción de plomo para biomasa fúngica (Penicillium cluniae), bentonita y carbón fueron q= 77.95 mg/g, q= 84,78 mg/g y q=98.48 mg/g respectivamente, lo que demuestra una gran potencialidad de aplicación de los materiales evaluados para la adsorción de plomo (II).

Palabras Clave: Adsorción, biomasa, activación, plomo.

INTRODUCCIÓN

Industrias como la minería, la fundición de metales, la producción de combustible y energía a partir de petróleo, la industria de fertilizantes y pesticidas y sus aplicaciones, entre otras, producen residuos que contienen metales pesados y éstos terminan transfiriéndose al medio ambiente debido a un incorrecto tratamiento o disposición final (Domenech X. and Peral J., 2008), (Londoño Franco L. and Londoño Muñoz P., 2016).
El proceso de adsorción y su aplicación se ha expandido en los últimos años, acompañada por el aumento en los requerimientos ambientales y de calidad en los productos. En forma permanente se sintetizan nuevos materiales adsorbentes con

propiedades especiales y aplicaciones específicas. Las activaciones de estos minerales mejoran algunas de sus propiedades para su uso como sorbentes (O'Connell et al, 2008). En la industria, la activación química y térmica son las más utilizadas. Generalmente, los adsorbentes utilizados suelen tener una alta porosidad y por tanto una elevada superficie específica. Es también importante que el adsorbente cuente con grupos funcionales cargados para fijar los iones disueltos y existen técnicas para activar o mejorar esta propiedad en algunos soportes sólidos, como tratamientos ácidos o básicos, aunque estas técnicas encarecen el proceso (Korkuna et al, 2006).
Numerosos materiales biológicos han sido estudiados con el fin de evaluar su potencial para la adsorción de metales pesados. Entre estos materiales, la biomasa bacteriana, hongos y algas marinas, constituyen el conjunto más estudiado hasta el momento y aparecen en bibliografía relevante (Muñoz et al, 2012; Castellón, 2014; Montoya 2005; Holanda 2016; Morillo 2008; Vendruscolo 2016; Chung et al 2013).
Los minerales arcillosos desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte (silicatos con estructura laminar), cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μm). Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación como adsorbentes. La capacidad de adsorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) (Hevia R., 2007).
Uno de los materiales más usados para la remoción de metales es el carbón activado, debido a su alta superficie específica, estabilidad química y durabilidad. Como carbón activado se designa a un amplio rango de materiales manufacturados basados en carbono que exhiben una estructura porosa muy desarrollada y una elevada área superficial interna. Además de sus propiedades texturales, la naturaleza química de su superficie es muy importante para sus aplicaciones específicas. (Giri, Patel and Mandal, 2012)

Por esto, el objetivo de este trabajo fue cuantificar y comparar la capacidad de adsorción de Pb (II) entre una biomasa de origen fúngico, bentonita y carbón activado.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

A-Preparación de las muestras

La biomasa de origen fúngico utilizada denominada HR, se aisló a partir de desecho minero (pila de lixiviación) de Mina Hualilán de la provincia de San Juan y sé identifico mediante técnicas de biología molecular. Para ello, en primer lugar se inoculó la cepa en medio líquido en estufa de cultivo a una temperatura de 28°C hasta su máximo crecimiento desarrollado en un tiempo total de 15 días. El medio de cultivo utilizado fue Sabouraud Glucosado caldo a volúmenes crecientes. Como el objetivo es generar una biomasa inerte, una vez que la cepa llegó a su máximo desarrollo, se esterilizó en autoclave unos 15 minutos. Después se procedió a lavar la biomasa repetidamente con agua destilada para eliminar lo más posible el medio de cultivo. Por último, se secó en estufa a 80° C hasta peso constante.
El carbón activado (Patroce Barnebey y Sutcliffe) usado fue provisto por Instituto de Química (UNSJ) con un área específica de 700 m^2/g.
La bentonita es de origen triásico proveniente de la provincia de San Juan (Grupo Barreal), con un área específica de 106,49 m^2/g.

B-Activación de los adsorbentes.
Se suspendieron 5 gramos tanto de biomasa seca y de bentonita en 100 ml de etanol (solución 70%) durante 1 hora a temperatura ambiente. Luego se filtró y se secó en estufa a 80°C hasta peso constante (Ezzouhri et al, 2008).
La activación física del carbón fue en dos etapas básicas de procesamiento, carbonización y activación. La primera etapa (pirolisis), se llevó a cabo a una temperatura de 880 °C y la segunda etapa se realizó en contacto del carbón restante de la etapa anterior, con un caudal de vapor de agua de 1,7 g/ (g h) (activación), durante un tiempo de 105 minutos (Deiana et al., 2009).

C- Estudio combinado de la influencia del pH, temperatura y concentración de biomasa en la capacidad de adsorción de plomo.
Para el estudio combinado de los cuatro factores más importantes que pueden influir en la capacidad de adsorción de HR, bentonita y carbón: pH, concentración de biomasa, concentración metálica y tiempo se ha desarrollado para cada variable respuesta un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR) con los 4 puntos centrales (que permiten analizar la falta de ajuste). Se modeló una superficie respuesta (MSR) y se encontró la mejor combinación de factores para maximizar la adsorción. En todos los casos se comprobó la idoneidad del modelo.
Los ensayos consistieron en poner en contacto la biomasa fúngica, la bentonita y el carbón activados, con soluciones de nitrato de plomo a distintas concentraciones, pH, concentración de adsorbente y tiempo. En total fueron 28 corridas del diseño experimental realizado con las muestras en estudio. En la Tabla I se muestra el diseño experimental, los niveles empleados en las variables independientes (factores) tanto para las biomasas HR-SA (sin activar), HR-E (activada), bentonita y carbón activado.

Tabla I. Factores y respuestas del diseño experimental.

Factores	**Bajo**	**Alto**
Tiempo (horas)	0,4	8
pH	4	5,8
Conc. de biomasa (g/l)	1	6,0
Conc. Metálica (ppm)	25	75

Respuestas	**unidades**
qe biomasa	mg/g
qe bentonita	mg/g
qe carbón	mg/g

Donde q = capacidad de adsorción (mg/g) y se calcula como se muestra en la ecuación. Ver Ec. (1).

$$qe = (ci-cf)*V/m \quad \textbf{(1)}$$

Donde ci y cf son las concentraciones de la disolución metálica inicial y final, V es el volumen de la solución y m es la cantidad de adsorbente en gramos.

D- Microscopia electrónica

Se realizó utilizando un SEM junto con rayos X dispersivos de energía (modelo EVO MA10W CarlZeiss original equipado con un sistema de microanálisis por dispersión de la marca de energía de rayos X (EDX) Bruker, modelo Quantax 200 con un tipo de detector analítico SDD XFlash 630). La finalidad de la aplicación de esta técnica es detectar la presencia del metal en los adsorbentes. Las observaciones se realizaron antes y después de los ensayos de adsorción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A- Como resultado del aislamiento se obtuvo un total de 10 cepas que mediante la determinación del Índice de Tolerancia (IT) permitió seleccionar una de las cepas más tolerantes al plomo (Muñoz, et al., 2012). La misma denominada HR fue identificada como *Penicillium cluniae* cuyo número de acceso de GenBank es GQ221866 con un 99,82 % de identidad.

C-Como resultado del estudio combinado, ver tabla II, la determinación de los términos estadísticamente significativos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) estudiando la variabilidad asociada con cada factor y las interacciones entre ellos. En este estudio, varios efectos tuvieron un Valor p menor que 0.05 al igual que las interacciones por lo que se decide incluir puntos axiales utilizando para el análisis un diseño Central Compuesto Rotable. Las tablas ANOVA para los factores principales en las variables de respuesta son las siguientes:

Tabla II. Análisis de Varianza para los adsorbentes.

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-P*
HR-SA					
A:pH	510.604	1	510.604	67.22	0.0038
B:Conc biomas	1364.34	1	1364.34	179.62	0.0009
C:Conc meta	331.735	1	331.735	43.67	0.0071
D:Tiempo	77.7292	1	77.7292	10.23	0.0494
R-cuadrada	82				
R-cuadrada ajustada	70,3				
HR- E					
A:pH	137.282	1	137.282	18.36	0.0234
B:Conc biomas	1470.04	1	1470.04	196.62	0.0008
C:Conc meta	437.567	1	437.567	58.52	0.0046
D:Tiempo	404.647	1	404.647	54.12	0.0052
R-cuadrada	84.14				
R-cuadrada ajustada	73.24				
Bentonita					
A:pH	24.6037	1	24.6037	1.23	0.3479
B:Conc biomas	3423.51	1	3423.51	171.52	0.0010
C:Conc meta	1275.52	1	1275.52	63.90	0.0041
D:Tiempo	1142.31	1	1142.31	57.23	0.0048
R-cuadrada	89.54				
R-cuadrada ajustada	78.2868				
Carbón					
A:pH	448.07	1	448.07	23.97	0.0163
B:Conc biomas	1577.37	1	1577.37	84.37	0.0027
C:Conc metal	403.506	1	403.506	21.58	0.0188
D:Tiempo	958.016	1	958.016	51.24	0.0056
R- cuadrado	86,9393				
R-cuadrada ajustada	72,8739				

Los resultados obtenidos se han ajustado a una ecuación cuadrática. Ver Ec. (2), utilizando el programa Statgraphics Centurión (programa estadístico que realiza y explica funciones estadísticas básicas y avanzadas).

$$q = \beta0 + \beta1\ pH + \beta2\ Conc.ad + \beta3\ Conc.Met. + \beta4\ t + \beta11\ pH2 + \beta22\ Conc\ ad.2 + \beta33\ Conc\ met.2 + \beta44\ t\ 2 + \beta12\ pH\ Conc\ ad. + \beta13\ pH\ concmet. + \beta14\ pH\ t + \beta23\ Concad.ConcMet + \beta24\ Conc\ ad.t + \beta34\ Conc.met.\ t \quad \textbf{(2)}$$

Donde q es la capacidad de biosorción en el equilibrio (mg metal por g biomasa seca); β0 es el coeficiente de intercepción; β1, β2 y β3 son los términos lineales; β11, β22, β33 y β44 son los términos cuadráticos; y β12, β13, β14, β24, β23 y β34 son los términos de interacción.
La bondad del ajuste del modelo fue determinada evaluando la falta de ajuste, el coeficiente de correlación (r^2) y el valor de la prueba de Fisher (F-valor) obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA). La significancia estadística del modelo y sus términos por separado fueron determinados para un nivel de significación del 5 % (p=0,05). Se obtuvieron modelos empíricos de cada adsorbente para el metal estudiado donde solo se introdujeron los términos estadísticamente significativos. A partir de estos modelos en Tabla III, además, nos han permitido optimizar los valores de los cuatro factores estudiados para un máximo de capacidad de adsorción (qe) utilizando el Método de la Función Deseada.

Tabla III. Valores óptimos de los factores para la máxima capacidad de adsorción de todos los adsorbentes empleados para plomo.

Adsorbentes	pH	Conc. Biomasa	Conc. Metálica	Tiempo	qe óptimo
Denominación		g/l	mg/l	horas	mg/g
HR-SA	5.8	1.0	100	11.60	60.01
HR-E	5.8	1.0	100	11.73	77.95
B	5.8	1,0	100	12	84.78
C	5,8	1,0	100	12	98,48

Donde: HR-SA=*Penicillium cluniae* sin activar
HR-E=*Penicillium cluniae* activado con etanol.
B= Bentonita activado con etanol.
C= carbón activado.

En los modelos correspondientes al metal estudiado se ha encontrado que el efecto de interacción entre la concentración de biomasa y concentración metálica, con signo negativo, esto significa que para un aumento de la concentración de biomasa la capacidad de biosorción disminuye la concentración metálica, como se puede apreciar en los gráficos de superficies de respuesta para HR-SA, HR-E, bentonita y carbón, “ver Fig. 1, 2 ,3 y 4”.

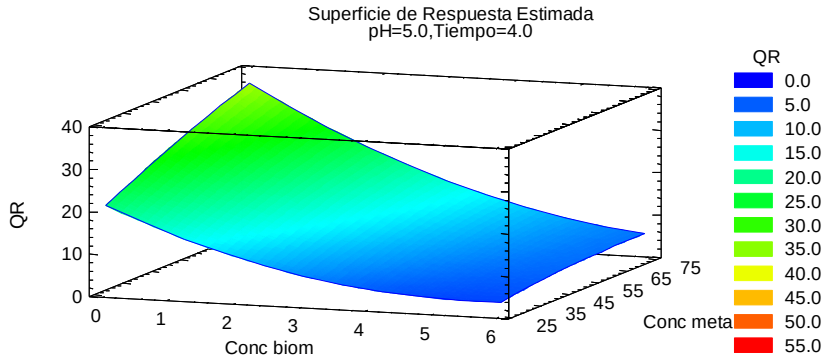


Figura 1. Gráfico de superficie de respuesta para HR-SA.

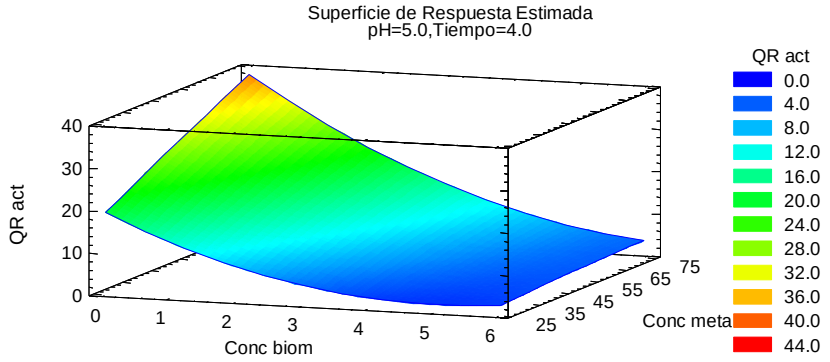


Figura 2. Gráfico de superficie de respuesta para HR-E.

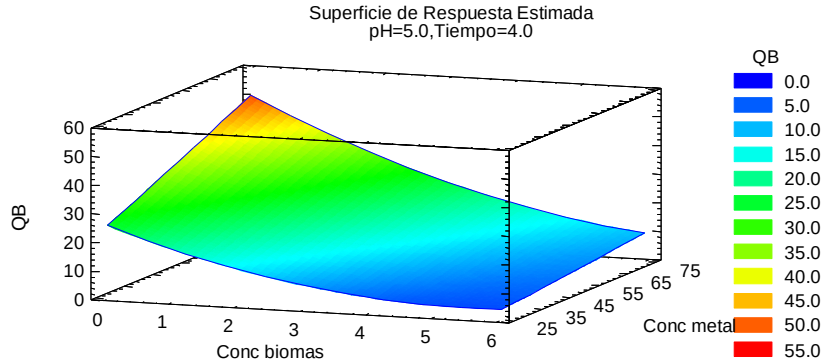


Figura 3. Gráfico de superficie de respuesta para bentonita.

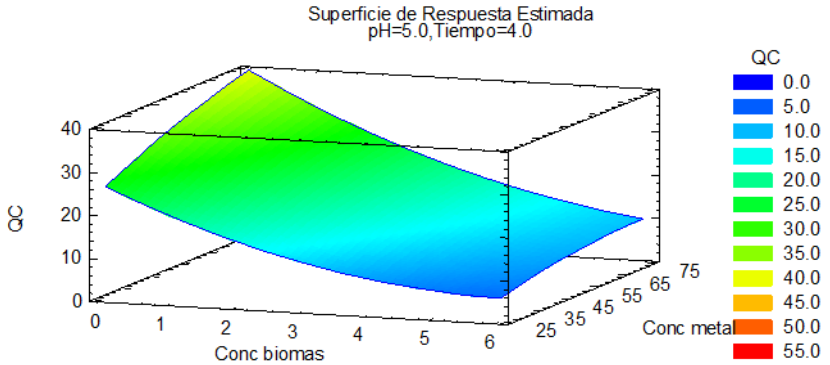


Figura 4. Gráfico de superficie de respuesta para carbón.

Para validar el modelo en estudio, se analizó los valores de capacidad de adsorción (q mg/g) en los puntos óptimos mediante un "Test t de Student de Muestras Apareadas" (la diferencia de valores entre el qexp y el qóptimo), concluyendo que no hay diferencias significativas entre los valores q experimental y el q óptimo según el modelo usado.
Como resultado de la microscopia electrónica, a continuación, se muestran micrografías de donde se evidencia la presencia del metal antes y después de la adsorción con el plomo. "Ver Fig. 5, 6 y 7".

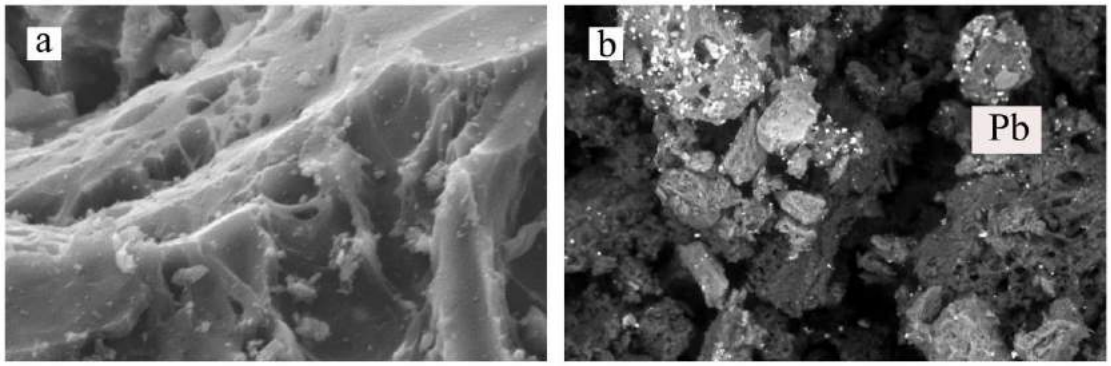


Figura 5. Micrografía de HR-E. **a.** antes de la adsorción. **b.** después de la adsorción

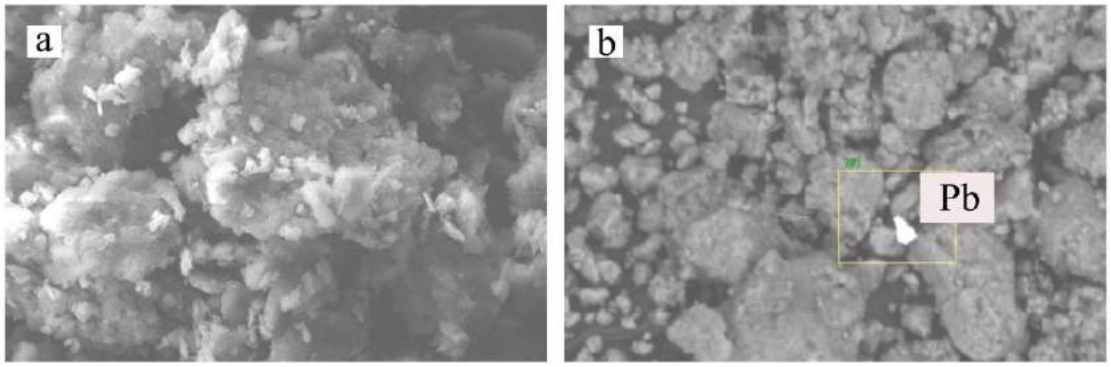


Figura 6. Micrografía de bentonita. **a.** antes de la adsorción. **b.** después de la adsorción.

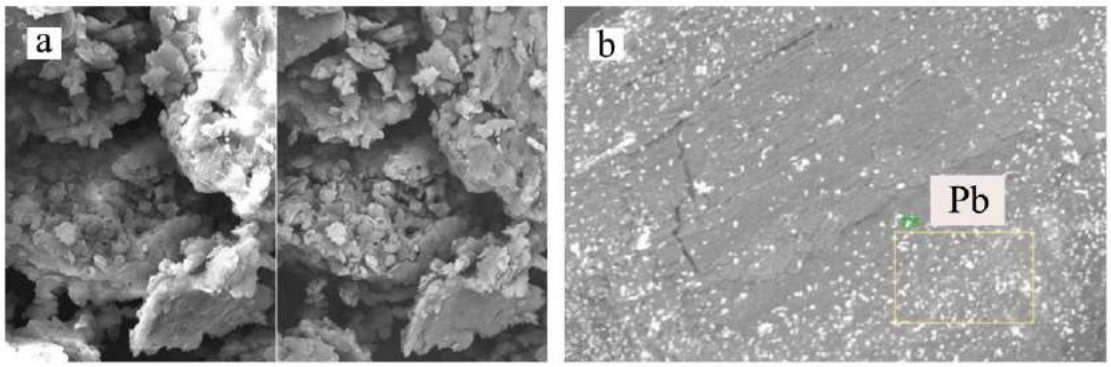


Figura 7. Micrografía del carbón. **a.** antes de la adsorción. **b.** después de la adsorción.

CONCLUSIONES

Se concluye, que se logró realizar ensayos de adsorción mediante la aplicación de un estudio combinado de pH, concentración de biomasa, concentración metálica y tiempo,

con el desarrollo de un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR). De esta manera se obtuvo una superficie cuadrática y se encontró la mejor combinación de factores para maximizar respuestas permitiendo obtener capacidades de adsorción de plomo tanto para biomasa fúngica, bentonita y carbón de q= 60.00 mg/g, q= 77,95 mg/g, q= 84,78 mg/g y q=98.48 mg/g respectivamente.

REFERENCIAS

Castellón, J., Marrugo, J. and Urango, I. Remoción de plomo, cadmio y mercurio en un efluente minero por medio de biomasa de hongos Penicillium sp. Universidad de Córdoba, Montería. Grupo de Aguas Química aplicada y ambiental, Facultad de Ciencias Básicas, Montería (2014).

Chung, A. P., Sousa, T., Pereira, A. and Morais, P. V. Microorganims-Tools for bioremediation of Uranium contaminated Environments. *Procedia earth and planetary science* 8, 53-58 (2013).

Deiana, A. C., Sardella, M. F., Silva, H., Amaya, A. and Tancredi, N. Use of grape stalk, a waste of the viticulture industry, to obtain activated carbon. *Journal of Hazardous Materials* 172, 13–19 (2009).

Domenech, X. and Peral, J. Química Ambiental de Sistemas Terrestres. Editorial Reverté. Barcelona, España. 239 pp. (2008).

Ezzouhri L., Castro E., Moya M., Espínola F., Guerrouj M., Rossi B., Lairini, K. Uptake of Lead by Saccharomyces cerevisiae isolated from Tangier brewery wastewater. *European Journal of Scientific Research* 19, 668-682 (2008).

Giri, A. K., Patel, R. and Mandal, S. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by Eichhornia crassipes root biomass-derived activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 185-186, 71-81 (2012).

Hevia, R. Bentonitas. Propiedades y usos industriales. Informe Inédito. Proyecto INTI-SEGEMAR, Unión Europea, 13 págs. (2007).

Holanda, R., Hedrich, S., Nancucheo, I., Oliveira, G., Grail, B. and Johnson, D. Isolation and characterization of mineral-oxidising “Acidibacillus” spp. From mine sites and geothermal environments in different global locations. *Research in microbiology* 167, 613-623 (2016).

Korkuna, O., Leboda, R., SKubiszewska Zieba, J., Vrubleus´ka, T., Gun´ko, V. M. and Ryczkowsku, J. Structural and physicochemical propierties of natural zeolites: clinoptilolite and mordenite. *Microporous and Mesoporous Materials* 87, 245- 254 (2006).

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T. and Muñoz Garcia, F. G. Risk of heavy metals in human and animal health. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14, 145-153 (2016).

Muñoz, A. J., Ruiz, E., Abriouel, H., Gálvez, A., Ezzouhri, L., Lairini, K. and Espínola, F. Heavy metal tolerance of microorganisms isolated from wastewaters: Identification and evaluation of its potential for biosorption. *Chemical Engineering Journal* 210, 325-332 (2012).

Muñoz, A. J., Espínola, F. and Ruiz, R. Biosorption of Ag (I) from aqueous solutions by Klebsiella sp. 3S1. *Journal of Hazardous Materials* 329, 166-177 (2017).

Montoya, C., Márquez, M., López, J. and Cuervo, C. Caracterización de cristales de calcita bioprecipitada por un aislamiento nativo de Bacillus subtilis. *Revista Colombiana. Biotecnol* 7, 19-25 (2005).

Morrillo, J., Ribera, R, Quesada, T., Aguilera, M., Cormenzana, A. and Sanchez, M. Biosorption of heavy metals by the exopolysaccharide produced by Paenibacillus jamilae. *World Journal Microbiol Biotechnol* 24, 2699–2704 (2008).

O’Connell, D. W., Birkinshaw, C. and O’Dwyer, T. F. Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: a review. *Bioresource Technology* 99, 6709 – 6724 (2008)

Vendruscolo, F., Ferreira, G. and Filho, N. Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms. *International Biodeterioration and Biodegradation* 30, 1-9 (2016).

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA "HIGH DEFINITION SURVEYING" EN LA INGENIERÍA

Huaman Tena H.[a]

[a]*Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica, Universidad Nacional Federico Villarreal, PERÚ*

e-mail: hectorhuamantena@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación es conocer las bondades de las nuevas tecnologías a la vanguardia en la toma de datos tridimensionales aplicables en cualquier proyecto de ingeniería, además de su precisión y calidad de éstos, nos permite disminuir el tiempo de trabajo en campo, disminuir errores humanos, lo cual se verán reflejados en los productos finales que son factibles ya sea en temas de construcción, arquitectura, industria, patrimonio, diseño de carreteras, etc. La tecnología "High Definition Surveying" – HDS, en este caso asignada por escáner terrestre ("ScanStation"), marca Leica, modelo P20, es relativamente nueva, versátil y eficiente lo cual se tomó como muestra del levantamiento el puente Villena Rey ubicado en Miraflores, Lima, Perú. Se obtuvo en el registro un error de promedio absoluto de 8 mm habilitando las restricciones, es decir aplicando los métodos de registro por "targets" y planos comunes y 3.8 cm deshabilitando estas restricciones. Dicha estructura cuenta con diversos complementos y detalles, los cuales se plasmaron en una nube de puntos integrada debidamente registrada con el software Cyclone haciendo secciones en superficies planas observando la continuidad de los puntos entre una estación y otra ya que existe ruido debido a diferentes factores como por el reflejo de ventanas, etc. La nube de puntos tomada por el láser escáner fue hecha en función de la huella y de la resolución asignada a este, que servirá para poder aplicar diseños BIM con las tecnologías HDS.

Palabras claves: Láser escáner terrestre, HDS, Cyclone, estructuras, nube de puntos.

INTRODUCCIÓN

A medida que va transcurriendo el tiempo, se implementan nuevas tecnologías en la toma de datos geoespaciales con la finalidad de digitalizar lo que nos rodea. Toda técnica empleada siempre es reforzada por otras con el fin de mejorar la calidad del producto, en el caso de un escáner terrestre, el propósito de recolectar una nube de puntos y posteriormente registrarla, la última palabra no la tiene un programa que determina cierto error en el registro de un proyecto. Se tiene que realizar verificaciones en superficies planas de cada agrupación de puntos proveniente del escaneo, observando la continuidad de los puntos aledaños, además discriminando el ruido creado por diversos factores presentando en terreno a cielo abierto, haciendo mención a esto, los resultados y complejidades que se presentan en el post-proceso son diferentes entre un levantamiento a cielo abierto y uno cerrado. Todo esto nos conduce a una metodología de trabajo donde los procesos son más refinados con el fin de tener un producto más semejante a la realidad, lo cual esto es uno de los objetivos de la ingeniería, plasmar lo real en un modelo.

En el artículo titulado "El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje" se tuvo como objetivo documentar mediante un archivo digital dicho patrimonio arquitectónico, utilizando el *"Terrestial Laser*

Scanner" – TLS, marca Leica, modelo C10, el modelamiento obtuvo 436282963 puntos captados en 17h:16m:52s en 4 días, además de comparar modelos texturizados de 0,5; 1; 2,5 y 5 cm de resolución. (García y Montes, 2012).
En la tesis doctoral titulado "Auscultación de presas de hormigón con láser escáner y modelización de las deformaciones del paramento" el cual tuvo como uno de sus objetivos la evaluación de distintos procedimientos de generación de modelos superficiales de deformaciones y análisis de la bondad de los resultados, utilizando el TLS Leica C10 se obtuvo el modelamiento de la presa con una precisión de 12 mm para todo el rango de distancias del equipo TLS. (Ramos, 2015).
Se planteó como problema principal: ¿Qué tan factible es el uso de esta tecnología? Y como problemas secundarios: ¿De qué manera se puede generar un archivo digital tridimensional?, ¿Cuál es la precisión de esta tecnología?
Por tal motivo, el presente estudio tiene como objetivo conocer las bondades de las nuevas tecnologías a la vanguardia en la toma de datos tridimensionales. Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos: Generar un archivo digital tridimensional del puente Villena Rey; Determinar la precisión del registro; Evaluar el flujo de trabajo de esta técnica.
La necesidad de la toma de datos geoespaciales en la ingeniería, genera la búsqueda de nuevas técnicas eficientes con la finalidad de disminuir el tiempo de trabajo y el error humano causado en la captura de datos. La importancia del uso en el sector privado, genera competencia debido a su versatilidad y precisión de recolección de datos.

MÉTODOS

Materiales

Herramientas

Para la adquisición de datos se utilizó como herramienta el escáner terrestre marca Leica modelo P20.



Figura 1. Láser escáner terrestre Leica P20. Fuente: Leica Geosystems.

Leica ScanStation P20:

- Velocidad máxima 1 millón de puntos por segundo.
- Alcance máximo 120m.
- Precisión de puntos 3D de 3mm a 50m.
- Precisión angular 8" (horizontal/vertical).
- Campo visual de 270º Vertical x 360º Horizontal

Tabla I. Tiempo y resolución de escaneo. Fuente: Leica Geosystems.				
Espaciamiento	Nivel de calidad			
mm	1	2	3	4
25	0:33	0:33	0:53	1:43
50	0:20	0:20	0:28	----
12.5	0:58	1:44	3:24	6:46
6.3	1:49	3:25	6:46	13:30
3.1	3:30	6:47	13:30	26:59
1.6	13:33	27:04	54:07	----
0.8	54:07	1:48:13	----	---

Dianas imantadas de control:



Figura 2. *"Targets" – Dianas marca Leica,* modelo 6" B/W - 5/8".

Se planteó la realización del levantamiento con láser escáner del puente Villena con el equipo láser escáner Leica P20 teniendo como método de orientación por "targets" los cuales se posicionaron dos de estos por cada posicionamiento del equipo.



Figura 3. Vista de una diana sobre una superficie metálica.

SOFTWARE

Leica Cyclone 9.0.3:

Cyclone cuenta con diferentes módulos con la finalidad de visualizar, registrar y gestionar nubes de puntos tomadas por un láser escáner terrestre. Los módulos necesarios para el trabajo en gabinete son:
SCAN: Es la interfaz de software para el funcionamiento de la Leica ScanStation, permite la introducción del área a escanear y la densidad de exploración, filtrado de datos, secuencias de comandos de exploración y reconocimiento automático. A continuación, se detallan algunos conceptos.
REGISTER: Proporciona el conjunto completo de herramientas para la alineación de las nubes de puntos capturados desde diferentes posiciones de exploración, de forma rápida y precisa, georreferenciar los datos de exploración, así como la capacidad de alinear áreas de superposición de nubes de puntos por el método de solape por correlación, que consiste en el emparejamiento entre un posicionamiento y otro.
MODEL: Este módulo versátil y potente permite utilizar directamente la nube de punto, para transformarlos en objetos tanto para la exportación robusta en CAD y otras aplicaciones), como para la importación. Tiene un gran conjunto de herramientas para el modelado 3D de la nube de puntos como geometría CAD o como mallas de ingeniería, topografía, arquitectura, etc.
SURVEY: Permite extraer rápidamente las características principales y coordinar la información de las nubes de puntos a través de la función Cyclone Virtual Surveyor™. Las herramientas soportan modelos complejos topográfico, con mallas mermadas que minimizan el tamaño del archivo, manteniendo al mismo tiempo la geometría exacta. Cyclone-SURVEY está dentro de Cyclone-MODEL y es un módulo ideal para topografía.
VIEWER-PRO: Este producto permite la visualización completa y la medición de los datos del ciclón en un ordenador. Cyclone-Viewer Pro proporciona una visión completa y capacidades de medición para permitir a los usuarios rotar, hacer zoom, navegar y capacidades de medida, así como la anotación de objeto y de importación / exportación de datos a través del ciclón, incluyendo las nubes de puntos y modelos 3D.
SERVER: Permite que los miembros de un grupo de trabajo tengan acceso al mismo tiempo al conjunto de datos de la nube de puntos 3D y / o modelos. Esto proporciona un potente entorno para la colaboración en el diseño de grandes y complejos proyectos, y puede reducir significativamente el tiempo de ejecución de los mismos.
PUBLISHER: Permite publicar nubes de puntos de datos en internet basados en el intercambio y la visualización, permitiendo el acceso desde cualquier lugar del mundo. Los usuarios pueden ver, zoom, o tener una panorámica de la nube de puntos de forma natural e intuitiva.
HARDWARE
Para los trabajos de gabinete y tener un buen flujo de trabajo se recomienda lo siguiente: Ordenador personal: Core i7-8700K @ 3.2 GHz, 32GB de RAM, disco duro de 1TB, disco SSD 480GB, tarjeta gráfica NVIDIA GeoForce GTX 1080Ti.
A medida que vamos gestionando información con mucho contenido además de los avances tecnológicos como por ejemplo en la fotogrametría nos hacemos dependientes de mejores ordenadores ya que se verán reflejados en las horas de trabajo en gabinete.

METODOLOGÍA

Se denomina Estudio de Alta Definición ("*High Definition Surveying*" – HDS) al método de medición no intrusivo que hace posible la adquisición de datos geoespaciales de una manera rápida, versátil, detallada y precisa de la realidad ya sea de una superficie o volumen mediante una herramienta que es el láser escáner terrestre.

Se planteó el siguiente flujo de trabajo:

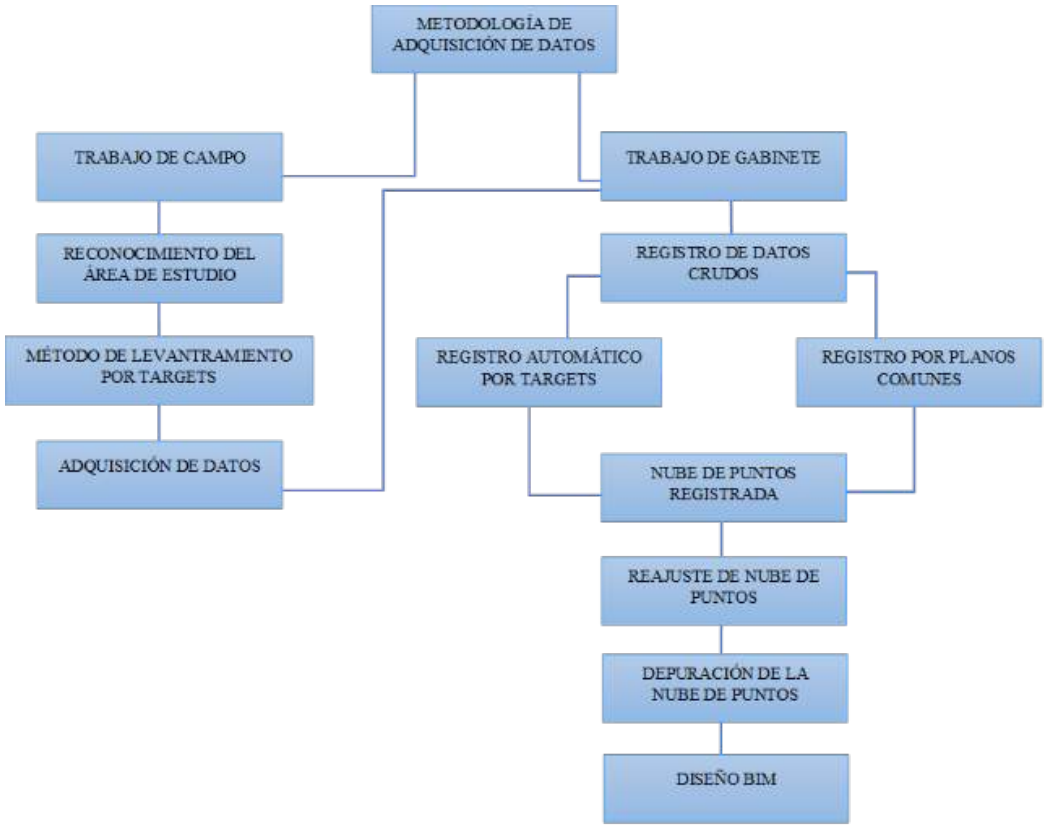


Figura 4. Esquema de flujo de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Procedimientos

Trabajo de campo: Esta etapa tiene como finalidad la adquisición de datos del puente Villena Rey. Antes de comenzar el trabajo se procedió a realizar un reconocimiento del área de estudio con la finalidad de recubrir la mayor información posible.



Figura 5. Puente Villena Rey.

Una vez hecho el reconocimiento de campo comenzamos a ubicarnos en diferentes posiciones del lugar teniendo en cuenta que debemos adquirir gran parte de la estructura.



Figura 6. Posicionamiento de láser escáner.

En la mayoría de posicionamientos se registraron dos targets con el láser escáner terrestre teniendo en cuenta que en el siguiente posicionamiento registraremos estos dos últimos para realizar el registro en el post-proceso por identificación automática por *"targets"*.

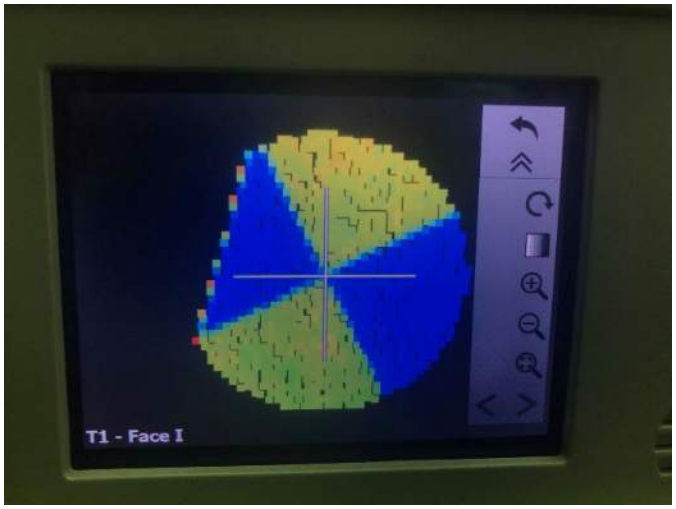


Figura 7. *"Target"* T1 tomado en el primer ScanWorld.

Se realizó un total de 22 escaneos, teniendo como recubrimiento la vía de transito además de los pilares del puente. Por cada posicionamiento, además de la toma de datos tridimensionales, se obtuvieron imágenes del posicionamiento, lo cual en el post-proceso podemos hacer una reconstrucción por mosaico con las imágenes obtenidas, lo cual nos resulta una vista en primera persona por cada posicionamiento, a esto se le denomina *"TruSpace"*.
La problemática en la toma de datos (Boheler, 2003) puede surgir al realizar la elección de estos estacionamientos, ya que una distancia no recomendable combinada con una orientación oblicua puede afectar negativamente a la calidad del registro provocando ruido o residuos en la nube de puntos que se obtenga.

Trabajo de gabinete: Esta etapa comienza con la exportación del proyecto del láser escáner terrestre hacia nuestro ordenador.
En esta etapa la información recogida en campo lleva una serie de procesos extremadamente largos y complejos (Bucksch, 2008). Para llevar a cabo el filtrado y unión de la información en un único modelo se emplea un software específico de visualización y edición de la base de datos. El programa permite a través de la nube de

puntos mostrada, obtener secciones o plantas de manera muy ágil, así como imágenes en perspectiva, ortoimágenes, vídeos, etc.
Registro por planos comunes: Este registro es un alineamiento visual de dos nubes de puntos tomadas por un láser escáner terrestre.
Con el software Cyclone se toma dos ScanWorlds los cuales tenemos que orientarlos desde un plano horizontal y vertical, posteriormente optimizamos esta restricción, lo que hará la búsqueda de planos comunes que son generados por la estimación de las normales de un grupo de puntos que representan una superficie plana en la realidad, la precisión de este tipo de registro se basa en el solape de superficies entre las dos nubes de puntos.



Figura 8. Alineamiento horizontal visual entre el ScanWorld 1 y ScanWorld 2.

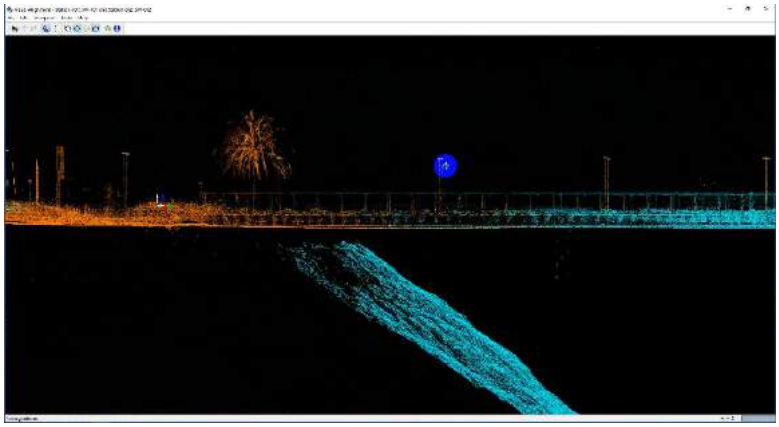


Figura 9. Alineamiento vertical visual entre el ScanWorld 1 y ScanWorld 2.

Es frecuente cuando el objeto a modelizar es extenso (caso particular de las presas) que por limitaciones en los equipos no se pueda realizar la toma de datos completa desde una única estación, siendo necesario obtener dos o más nubes de puntos 3D desde otras tantas estaciones. Esto obligará posteriormente a realizar transformaciones para registrar todas las nubes de puntos 3D en un solo sistema de coordenadas local y posteriormente georreferenciarlos. Habrá entonces que diseñar áreas de solape entre las diferentes nubes de puntos y la posición correcta de los puntos de control en número suficiente para que sean visibles como mínimo 3 desde cada estación. (Ramos, 2015)

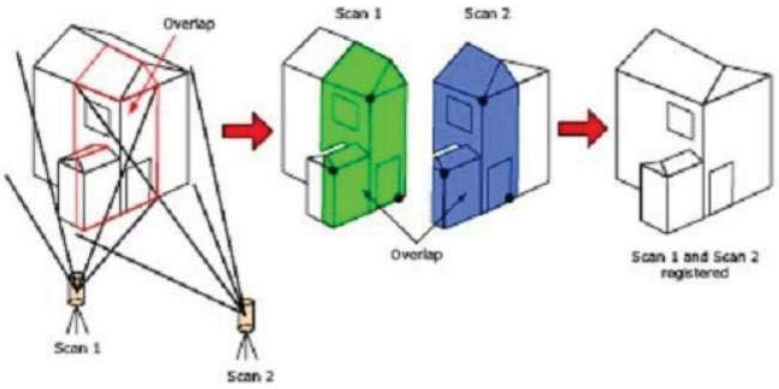


Figura 10. Solape de nube de puntos y puntos de control (Márquez, 2010)

Registro automático por "targets": Este tipo registro se basa en dianas que se fijaron en el trabajo de campo, en la mayoría de posicionamientos del láser escáner terrestre se solapaban dos dianas entre un escaneo y otro, estas dianas eran registradas por el mismo equipo para acoplarlas al proyecto, ya que a la hora de importar los datos crudos al software Cyclone, este los reconoce para su registro, si es que en un estacionamiento no se tiene registrado alguna diana, se procede a hacer el registro por planos comunes.

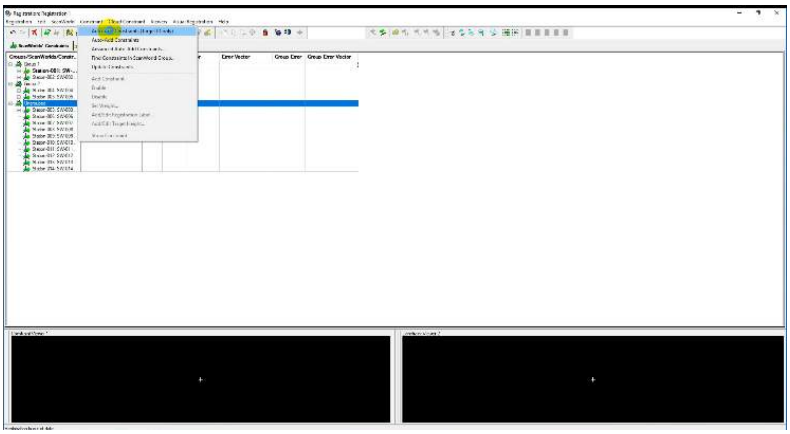


Figura 11. Registro automático por *"targets"*.

Se obtuvo la agrupación de los escaneos interrelacionados entre sí:

Groups/ScanWorlds/Constraint ID	Type	Status	Weight	Error
Group 1				
Station-001: SW-001 (Leveled)				
Station-002: SW-002 (Leveled)				
Station-015: SW-015 (Leveled)				
Group 2				
Station-004: SW-004 (Leveled)				
Station-005: SW-005 (Leveled)				
Group 3				
Station-010: SW-010 (Leveled)				
Station-011: SW-011 (Leveled)				
Ungrouped				
Station-003: SW-003 (Leveled)				
Station-006: SW-006 (Leveled)				
Station-007: SW-007 (Leveled)				
Station-008: SW-008 (Leveled)				
Station-009: SW-009 (Leveled)				
Station-012: SW-012 (Leveled)				
Station-013: SW-013 (Leveled)				
Station-014: SW-014 (Leveled)				
Station-016: SW-016 (Leveled)				
Station-017: SW-017 (Leveled)				
Station-018: SW-018 (Leveled)				
Station-019: SW-019 (Leveled)				
Station-020: SW-020 (Leveled)				
Station-021: SW-021 (Leveled)				
Station-022: SW-022 (Leveled)				

Figura 12. Agrupación de escaneos.

Reajuste de nube de puntos: Una vez realizado el registro, obtenemos una nube de puntos global de todos los escaneos realizados, tenemos que tener en cuenta que no necesariamente tenemos que dejar por concluido el registro con el error medio cuadrático (RMS) que nos arroja el software Cyclone. Por ende, procedemos a fijarnos la continuidad de los puntos en una superficie en común tomada por diferentes posicionamientos.

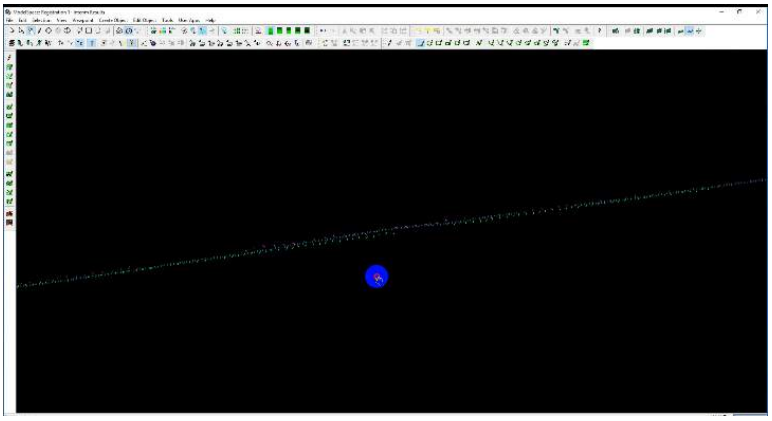


Figura 13. Vista planta de corte longitudinal de una superficie sin continuidad.

Teniendo este tipo de observaciones, los resultados que nos arroja el programa tienen que ser revisados realizando cortes en superficies de solape entre escaneos. Debemos aplicar el reajuste, por eso debemos de identificar primero de donde proviene el error, por ejemplo, si en el registro de dos posicionamientos obtenemos un alto RMS, optamos en deshabilitarlo o cambiar su factor de deformación con el objetivo de calzar correctamente los puntos en dicha superficie. Además, podemos auto añadir una restricción de nubes, esto hace que se busque puntos homólogos para poder refinar aún más el registro.

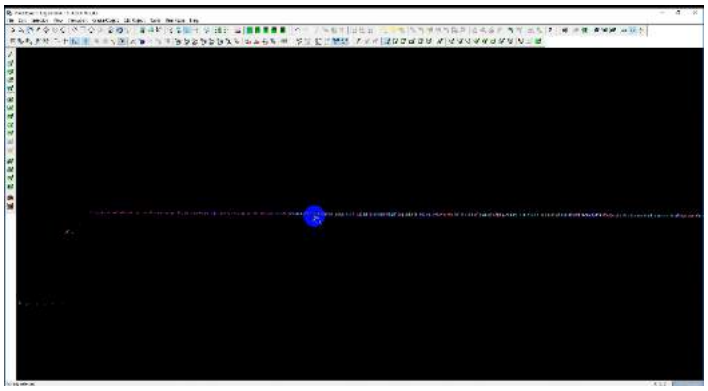


Figura 14. Vista planta de corte longitudinal de una superficie con continuidad.

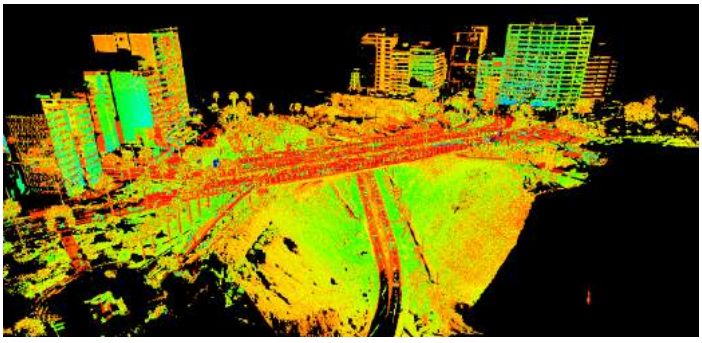


Figura 15. Nube de puntos registrada.

Depuración de la nube de puntos: En el reconocimiento del área de estudio se pudo observar que existía tránsito peatonal y vehicular, lo cual a la hora realizar el escaneo se registra puntos sin ninguna semejanza con la realidad.

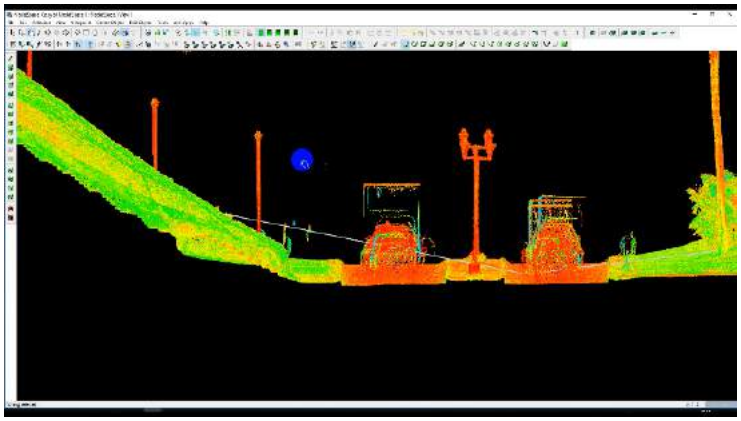


Figura 16. Ruido generado por objetos en movimiento.

Con estas observaciones procedemos a la limpieza lo cual la realizamos de forma manual o automático en superficies homogéneas.



Figura 17. Nube de punto depurada de vehículos.

Una vez obtenido la nube de puntos depurada, libre de ruido, diseñamos objetos para obtener modelamientos tridimensionales, estos objetos pueden ser por ejemplo cajas, cilindros, tuberías, superficies, etc.

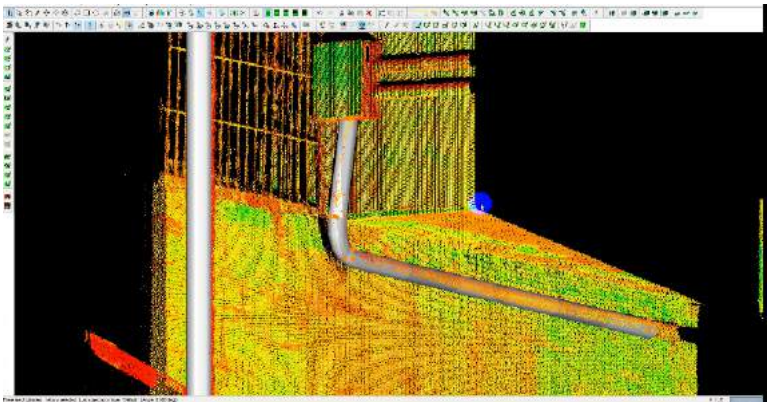


Figura 18. Diseño de un cilindro que representa a un poste de alumbrado y un conducto de electricidad.

RESULTADOS

Se obtuvo en el registro del proyecto un error de promedio absoluto de 8 mm habilitando las restricciones, es decir aplicando los métodos de registro por “targets” y planos comunes y 3.8 cm deshabilitando estas restricciones.
El tiempo promedio de registro de datos fue de 10 minutos con 25 segundos por posicionamiento, con un total de 22 estaciones realizadas en 3 días con un tiempo de trabajo aproximado de 3 horas por día.
La nube de puntos registradas cuenta con 491757337 puntos lo que representa el modelado del puente además de estructuras aledañas como edificios, taludes, pistas, etc.

Tabla II. Datos de los posicionamientos. Fuente: Elaboración propia.

Posicionamiento	Fecha	Tiempo de captura (mm:ss)	Espaciamiento (mm)	Calidad	Número de imágenes	Número de puntos
Station-001	1/04/2018	10:25	6.3	2	260	13354874
Station-002	1/04/2018	10:25	6.3	2	260	22163248
Station-003	1/04/2018	10:25	6.3	2	260	15433224
Station-004	1/04/2018	10:25	6.3	2	260	14686410
Station-005	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	19018939
Station-006	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	34526804
Station-007	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	30088446
Station-008	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	34728353
Station-009	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	25417918
Station-010	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	17943910
Station-011	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	18749742
Station-012	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	15171186
Station-013	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	21654022
Station-014	2/04/2018	10:25	6.3	2	260	22826193
Station-015	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	13059874
Station-016	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	17031986
Station-017	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	34524663
Station-018	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	29722335
Station-019	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	34659531
Station-020	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	15829561
Station-021	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	13110504
Station-022	3/04/2018	10:25	6.3	2	260	28055614
22	**2 días**	**03:49:10**	**6.3**	**2**	**5720**	**491757337**

 ISBN 978-987-1323-66-1

DISCUSIÓN

Según el estudio de Ramos A. (2015), el registro de la presa como unidad de estudio se obtuvo una precisión de 12 mm para todo el rango de distancias del equipo a comparación de los 8 mm de nuestro estudio empleados en "targets" en ambos casos.
Según el estudio de García y Montes (2012), sobre el modelado de un patrimonio arquitectónico, se realizó en 17h:16m:52s en 4 días de un total de 16 posicionamientos con una captura de 436282963 puntos, lo cual se infiere a comparación de nuestro estudio que el equipo TLS Leica P20 es más versátil y eficiente que el TLS Leica C10
El tiempo de registro de datos por posicionamiento es constante debido a que el láser escáner terrestre estaba nivelado, por ende, el tiempo aumentará cuando no lo esté.
El uso de los "targets" optimizaron el tiempo de gabinete, sin embargo, el número de éstos influyen en la precisión del registro, además de partir con el primer registro de los dos primeros posicionamientos por planos comunes, no es lo más de recomendable debido que se verá reflejado en la precisión del producto final.
En la utilización de cualquier software de registro, no debemos dejarnos influenciar con los primeros resultados; se debe verificar realizando secciones la continuidad de los puntos sobre una superficie, lo cual se tiene que llegar a resolver.

CONCLUSIONES

La aplicación de la tecnología HDS es factible para la recolección de datos geoespaciales, lo cual nos representa un modelo fidedigno con la realidad y es esto uno de los objetivos en la ingeniería.

Se obtuvo una precisión 8 mm en el registro de datos del puente Villena Rey utilizando los métodos por *"targets"* y planos comunes.

Con la técnica HDS nos permite obtener un archivo digital con gran calidad y detalle en un momento dado de nuestra muestra, lo que permite tener una base de datos documentada de resguardo.

REFERENCIAS

Boehler W.; Bordas Vicent M.; Marbs A. (2003). "*Investigating Laser Scanner Accuracy*". XIXth CIPA Symposium at Anatalya. Turkey.

Bucksch, A.; Lindenbergh, R. (2008). "*CAMPINO— A skeletonization method for point cloud processing*". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, nº 63 (1), pp. 115- 127.

García M.; Montes T. (2012). "*El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje"*. Universidad de Córdoba. España.

Márquez A. (2010). "*Un tratado sobre el escáner terrestre TLS"*. Mediciones Científicas e Industriales C. A. Venezuela.

Ramos A. (2015). "*Auscultación de presas de hormigón con láser escáner y modelización de las deformaciones del paramento"*. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Maurizio B.; Margherita F.; Andrea L. (2017). "*Uncertainty in Terrestrial Laser Scanner Surveys of Landslides"*. MDPI, Basel, Switzerland.

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO MENDOZA Y SUS SUBCUENCAS. MENDOZA. ARGENTINA

Lauro C.[a], Vich A.I.J.[ab], Moreiras S.M.[ac], Otta S. [a], Vaccarino E. [a], Bastidas L.[a]

[a]*Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, CCT-Mendoza, CONICET, ARGENTINA*
[b]*Instituto de Estudios del Ambiente y los Recursos Naturales (IDEARN), Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[c]*Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*

e-mail: clauro@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

La cuenca del río Mendoza se localiza en la cordillera de los Andes y aporta agua al oasis norte mendocino cuya población supera el millón de habitantes. El comportamiento hidrológico y procesos de erosión/deposición, entre otros fenómenos, pueden ser estudiados a partir del análisis de las características morfométricas de las cuencas. El objetivo es determinar parámetros morfométricos relacionados con la geometría, relieve y red de drenaje, para establecer características propias de la cuenca del río Mendoza y las subcuencas de los ríos Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato. La obtención de los parámetros y su relación con el caudal constituyen una herramienta de utilidad para el manejo de cuencas. A tal efecto, se utilizó el Modelo Digital de Elevación del Instituto Geográfico Militar y el modelo SRTM. Se delimitaron cuencas, se determinaron sus dimensiones, se obtuvo la curva hipsométrica de cada cuenca, altura y pendiente media y las características de la red de drenaje. Todos estos procesos fueron realizados en base a un sistema de información geográfica (SIG) con el soporte técnico de un software libre; SAGA GIS y Qgis. La cuenca alta del río Mendoza posee una superficie de 7350 km^2, un perímetro de 653 km, siendo considerada de orden 5. La altura media es 3509 msnm, la pendiente media 44% y la orientación media 171° respecto del Norte. La subcuenca del río Tupungato es la de mayor superficie (1762 km) y la que aporta mayor caudal al río Mendoza. La red de drenaje de la cuenca del río Mendoza y de las subcuencas presenta una baja densidad, que junto al índice de textura indican que están conformadas por material grueso de alta permeabilidad. Las relaciones entre los parámetros y el escurrimiento constituyen una herramienta esencial en la gestión de los recursos hídricos.

Palabras Clave: Parámetros morfométricos, Cuenca hidrográfica, Modelo digital de elevación, Mendoza.

INTRODUCCIÓN

La provincia de Mendoza, mediterránea y continental, de clima árido a semiárido, se encuentra situada al pie de la Cordillera de los Andes; se extiende en el centro oeste de Argentina, entre los 32º 35’ de latitud sur y los 66º 30’ y 70º 35’ de longitud oeste. El desarrollo del oasis norte de la provincia, fue posible gracias al aprovechamiento del río Mendoza. Utilizado para las actividades agrícolas e industriales, como así también, para

el uso doméstico. Los procesos hidrometeorológicos como las crecientes y los procesos de erosión comprometen la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos de más de un millón de habitantes.

La evaluación de las características de una cuenca es necesaria para optimizar la gestión de los recursos hídricos y conservación de los recursos naturales. En el estudio del régimen hídrico de una cuenca, es importante la evaluación de las características físicas y morfométricas (Gregory y Walling, 1973, 1979; Alves y Castro, 2003; Cardoso et al, 2006; Hott et al, 2007). Las características físicas de la cuenca hidrográfica influyen notablemente sobre la respuesta hidrológica de la misma; recíprocamente, el aspecto hidrológico de la cuenca contribuye considerablemente a la conformación de ellas. Las características físicas se relacionan con las componentes físicos-geográficas de la cuenca (localización, estructura geológica, cobertura vegetal y relieve) y con las características hidrometeorológicas (radiación solar, temperatura, evaporación, precipitación, etc.). Mientras que las características morfométricas son indicadores cuantitativos de los elementos de la cuenca que de una manera u otra influyen en la magnitud y variabilidad de los procesos hidrológicos. Constituyen una base cuantitativa para predecir la respuesta de la cuenca en función de algunos parámetros (Gaspari et al, 2013). Éstos pueden agruparse en aquellos que se refieren a la geometría de la cuenca como la superficie, perímetro e índices de forma, otros se relacionan con la distribución de las altitudes y las pendientes, por último se encuentran los vinculados a la red de drenaje como la longitud de los cauces, pendiente del cauce, entre otros (Vich, 1996).

El objetivo del presente trabajo es estimar los parámetros morfométricos para establecer las características propias de la cuenca y subcuencas del río Mendoza. Esta información constituye una herramienta esencial en el análisis de las cuencas fluviales en términos de conservación de suelo y agua, como así también para el manejo de los recursos naturales.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio está constituida por la cuenca hidrográfica del río Mendoza y las subcuencas del río Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato, localizadas en la cordillera de Los Andes en el centro oeste de la República Argentina (Fig. 1). Forman parte del sistema hidrográfico del río Colorado localizado íntegramente en el territorio nacional entre los paralelos 27°35’ y 36°12’ de latitud Sur, con una superficie aproximada de 361.620 km^2. Sus cauces nacen en las altas cumbres de la cordillera de Los Andes y presenta una importante red de drenaje que al alcanzar la llanura se transforman en cauces alóctonos. El sistema es colectado por el río Desaguadero, el cual esporádicamente desagua en el río Colorado que vierte sus aguas en el mar Argentino, por ello se lo conoce como sistema del río Colorado.

La mayor parte del territorio la cuenca presenta un clima seco desértico y estepario en el llano (Norte, 1988) y climas polares fríos de altura, de tundra y de hielos eternos, en las áreas cordilleranas por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar (Köeppen, 1948). La cordillera de Los Andes modula el régimen de precipitación de las cuencas producto del bloqueo de las masas de aire originadas en los sistemas anticiclónicos del Pacífico y Atlántico (Prohaska, 1976), consecuentemente se presentan dos sistemas de precipitación uno invernal (Junio, Julio y Agosto) producto del anticiclón semipermanente del Pacífico cuyo alcance es las zonas altas de la cuenca con un gradiente de oeste a este y un sistema estival (Diciembre, Enero y Febrero) proveniente del anticiclón del Atlántico afectando las zonas de llanura de las cuencas. Las

temperaturas son mínimas en los meses de Junio a Agosto y máximas de Diciembre a Febrero.
El gradiente altitudinal es de oeste a este y de norte a sur, alcanzando alturas que van desde los 900 msnm a más de 6000 msnm. La variación estacional del caudal es función de las variaciones estacionales de la precipitación y la temperatura junto a las características topográficas, geológicas y de vegetación.
El río Mendoza (Qa 45,89 m^3/s) se origina a partir de la confluencia del río Las Cuevas (Qa 6,80 m^3/s) que llega por el oeste y el río Tupungato (Qa 23,53 m^3/s) por el sur, tiene como primer afluente el río Las Vacas (Qa 4,42 m^3/s). El río Las Cuevas nace en las cabeceras de la quebrada Benjamín Matienzo por aporte nivo-glaciar, sus principales afluentes provienen de la quebrada de Horcones y Santa María. El 8,5 % de la superficie de esta subcuenca está ocupada por glaciares y crioformas, de los cuales solo el 25 % son glaciares descubiertos (ING, 2012a). El río Tupungato nace de la confluencia del río del Plomo y Santa Clara, el primero se origina por deshielos provenientes de los cerros Tupungato (6635 m), Nevado del Plomo (6071 m) y Juncal (4621 m) entre otros, y el rio Santa Clara por deshielos del cerro homónimo (5460 m) el régimen fluvial es del subtipo glaciario clásico (Lauro et al, 2016). La superficie de la cuenca cubierta por geoformas glaciares y periglaciares es de 292 km^2 (ING, 2012b). El río Las Vacas nace al sur de la ladera oriental del Co. Aconcagua (6962 m), sus afluentes provienen de la quebrada de los relinchos y Fiera. El 9,7 % de la superficie presenta geoformas glaciares, de los cuales el 62 % son glaciares descubiertos (ING, 2012a). Aguas abajo el ya conformado río Mendoza recibe por la margen derecha las aguas de los ríos Colorado, Blanco y Casa de Piedra provenientes del cordón del Plata, el ambiente predominante en este sector es periglacial característico de las zonas áridas, el 65 % de los cuerpos inventariados son glaciares cubiertos con glaciares de escombros y a glaciares de escombros propiamente dichos (ING, 2012c). Por la margen izquierda el río Mendoza recibe al río Picheuta y los arroyos Tambillos, Cortaderas, Ranchitos y Uspallata, éstos provienen de la cordillera del Tigre donde se inventariaron 319 cuerpos de hielo, de los cuales el 60 % corresponden a glaciares de escombros de orientación SE localizados entre los 3292 y 5606 msnm (ING, 2012d). Se toma como punto de cierre de la cuenca la estación de aforo Guido (32° 54’ S, 69° 14’O, 1550 msnm).

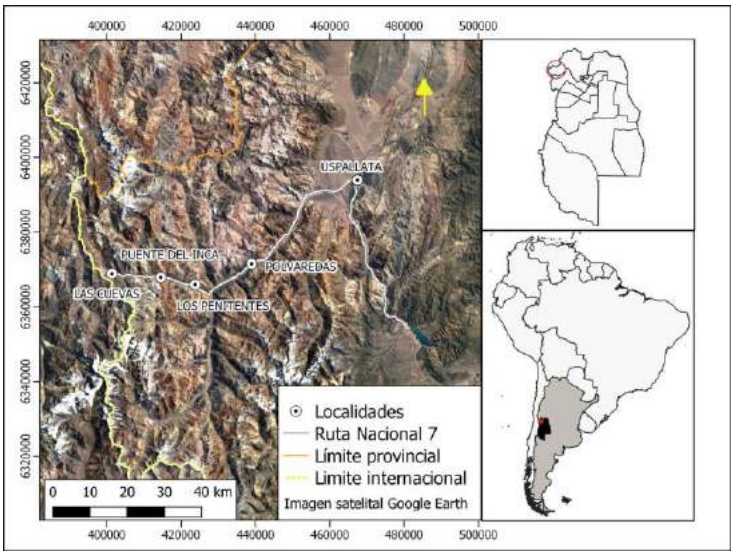


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Marco geológico

En la zona de estudio, la cuenca del río Mendoza transcurre en el ámbito geológico de la Cordillera Principal, Cordillera Frontal, en cercanías al punto de cierre transcurre por un sector de la Precordillera. Afloran rocas marinas y continentales clásticas de edad jurásica-cretásica y volcanitas, priroclastitas y psefitas terciarias. También se observan depósitos cuaternarios; glaciarios, glacifluviales, fluviales y coluviales. La Cordillera Frontal comprende depósitos neopaleozoicos que se asientan mediante discordancia angular sobre un basamento de edad proterozoica media. Presenta estratos marinos, los productos intrusivos y volcánicos se interdigitan y emplazan en secuencias neopaleozoicas (Ramos, 1999). El sector estudiado corresponde a la faja plegada y corrida del Aconcagua (Ramos, 1996). Afectada por fallamientos regionales de rumbo norte-sur y vergencia oriental. El paisaje corresponde a un ambiente de montañas de bloques con valles tectónicos longitudinales modificados por el accionar de procesos glaciarios y de remoción en masa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y procesamiento del modelo digital de elevaciones

Se utilizó el modelo digital de elevaciones (MDE) elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2014). Éste tiene una resolución de 45x45 m georeferenciado en coordenadas geográficas y Datum WGS84. Se encuentra accesible en la página web de la institución http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa. Los sectores limítrofes de la cordillera se complementaron con el modelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA. El tamaño de pixel resultante es de 39x39 m con coordenadas planas UTM faja 19S.

Modelos digitales derivados:

A partir del MDE, se obtuvieron modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía (Felicísimo, 1994). Estos son: modelos de pendiente y orientación. Además para delimitar la cuenca del río Mendoza fue necesario obtener modelos de: dirección de flujo, área subsidiaria, número de orden de Strahler y red de canales. Para ello se utilizó el software SAGA GIS.

Delimitación de las subcuencas

Las subcuencas de los río Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato se delimitaron con Qgis, primero se recortó el MDE con el polígono de la cuenca del río Mendoza (obtenida previamente). Luego se obtuvo el mapa correspondiente al orden de Strahler, a continuación se determinó la red hídrica, el valor umbral se considero igual a 5 y el segmento mínimo en unidades de celda fue 1000 para obtener únicamente la red de cauces principales. Finalmente, a partir de la red hídrica y del MDE se delimitaron las subcuencas. La red hídrica considerada en este trabajo es la correspondiente a las cartas topográficas 1:500.000 del Instituto Geográfico Nacional (Atlas 500k; IGN, 2010).

Parámetros morfométricos

Para el cálculo de los parámetros se utilizó el software Qgis y planillas de cálculo. A continuación se presenta la lista de parámetros empleados, su procedimiento de cálculo o definición.

Tabla I: Listado de Parámetros.

	Parámetro	Unidad	Ecuación/Definición	Referencia
Forma	Área **(Au)**	km^2	Área resultante de la proyección de la cuenca en un plano.	
	Perímetro **(Pu)**	km	Longitud del contorno de la proyección de la cuenca en un plano.	
	Cuerda **(L)**	km	Distancia entre el punto de aforo y el punto más lejano a éste.	
	Relación de circularidad **(C)**	---	Relaciona el área de la cuenca con la superficie de un círculo que posee igual perímetro que la unidad de estudio. $C = \frac{4\pi A_u}{P_u^2}$	Miller, 1972 en Vich, 1999
	Relación de elongación **(E)**	---	Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. $E = \frac{\sqrt{\frac{4A_u}{\pi}}}{L}$	Schumm, 1956 en Vich, 1999
Relieve	Cota máxima **(Hmax)**	msnm	Altura máxima de la cuenca. Valor máximo del pixel correspondiente a la cuenca.	
	Cota mínima **(Hmin)**	msnm	Altura mínima de la cuenca. Valor mínimo del pixel correspondiente al MDE de la cuenca.	
	Diferencia cota máxima y mínima **(DH)**	msnm	Diferencia entre altura máxima y mínima. Diferencia entre los valores de pixel máximo y mínimo del MDE de cada cuenca.	
	Cota media **(Hm)**	msnm	Valor medio de las alturas en la cuenca.	
	Curva hipsométrica		Representa la proporción del área de la cuenca por encima de una determinada altura.	
	Pendiente media de la cuenca **(S)**	%/°	Pendiente promedio de todas las laderas.	
	Orientación **(O)**	Grados	Dirección media de la pendiente de cada pixel. Grados respecto al N (0° a 360°)	
	Longitud del cauce principal **(Lc)**	km	Longitud del cauce que conecta el punto de aforo con el punto más alejado de la cuenca.	
	Pendiente media del cauce **(Sc)**	m/m	Promedio de la relación entre la diferencia de altura entre dos puntos y la distancia que los separa.	Linsley et al, 1977 en Vich, 1999
Red de derange	Conjunto de Strahler **(N_K^S)**	--	Donde: N_u es el número de cauces de orden u; K orden de la cuenca. $N_K^S = (N_u, N_{u+1}, \dots N_{k-1}, 1)$	Strahler 1964 en Vich 1999
	Densidad de drenaje **(Dd)**	km/km^2	Relación entre la longitud de todos los cauces de cualquier orden (Lt) y el área de la cuenca. $D_d = L_t/A_u$	Horton 1932
	Contante de mantenimiento del canal **(Ck)**	km^2/km	Representa la superficie de la cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. $C_k = 1/D_d$	Shumm 1956
	Frecuencia de canales **(F)**	m^{-2}	Número de cauces por unidad de superficie. $F = N°cauces/A_u$	Horton 1932
	Textura de drenaje **(Td)**	m^{-1}	$Td = N°cauces/Pu$	Horton 1945
	Relación de bifurcación **(Rb)**	---	Relaciona el número de cauces de un orden con el número de cauces de orden inmediato superior. $R_b = N_{u-1}/N_u$	
	Relación de longitud **(Rl)**	---	Razón de incremento entre la longitud media de los cauces y el orden de magnitud de los mismos. $R_l = \bar{L}_u/\bar{L}_{u-1}$	Horton 1945
	Relación de área **(Ra)**	---	Relación entre el área de drenaje y su orden. $R_a = \bar{A}_u/\bar{A}_{u-1}$	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuenca del río Mendoza

La cuenca del río Mendoza definida con su punto de cierre en la estación de aforo Guido (32° 54' S, 69° 14'O, 1550 msnm), posee una superficie de 7350 km^2 y un perímetro de 653 km. Los índices de forma revelan el comportamiento del escurrimiento (Vich, 1996; Gaspari et al, 2013), en este caso, los índices empleados coinciden en que la cuenca se aleja de la forma del círculo, acercándose a una forma rectangular-oblonga. Esta característica le confiere al escurrimiento la propiedad de presentarse en la desembocadura de forma retardada entre el momento de la precipitación y la crecida, la cual, puede presentarse antes de la llegada al cauce principal o bien incrementarse hacia la desembocadura.

Los aspectos del relieve indican que la cuenca posee un desnivel de 5486 msnm, con una altura máxima de 6900 msnm y una altura mínima de 1414 msnm. La altura media es de 3509 msnm, el 50% de la superficie de la cuenca se encuentra por encima de dicha altura (Fig. 4). La curva hipsométrica relativa (Fig. 3) muestra características de que la cuenca se encuentra en una fase de equilibrio, la curva hacia la parte media presenta un incremento en la pendiente indicando un relieve menos acentuado en la parte baja de la cuenca.

El rango de pendiente media en la cuenca del río Mendoza va de 0 a 73 grados, siendo las zonas de menor pendiente las representadas en color amarillo en la Fig. 2b. Puede observarse que tanto los cursos fluviales como las crestas presentan pendientes entre 0-18°, las zonas con glaciares también presentan pendientes bajas. Las pendientes elevadas constituyen uno de los factores más relevantes de la susceptibilidad a la erosión, influyendo en la capacidad de transporte de agua (Ciccacci et al, 1987, Marmol, 2008). La erosión en manto se origina a partir de pendientes mayores a 10° Endlicher (1982), en tanto la formación de cárcavas con pendientes mayores a 15° Andreade y Castro (1976). La cuenca del río Mendoza, con una pendiente media de 23° (44%) es susceptible a diversos procesos erosivos, entre ellos se destacan los procesos de remoción en masa. De hecho, una gran cantidad de deslizamientos, flujos de detritos y caídas de rocas asociados a pendientes abruptas, entre otros factores, ocurren en diversos sectores de la misma (Moreiras et al, 2008). La orientación de las laderas más frecuente es hacia el Este. La importancia de la orientación de laderas en cuencas de régimen nivo-glacial radica en los procesos de fusión nival y ablación glaciar que conforman el escurrimiento de la cuenca, considerando que las superficies de exposición norte y este recibirán mayor insolación que las de exposición sur y oeste. Como producto de los procesos de congelamiento/descongelamiento las laderas de los valles son asimétricos (Ahumada, 1986).

La red de drenaje se caracteriza por ser dendrítica de orden 5. El número de cauces decrece conforme aumenta el orden de los cauces. En total para cuenca del río Mendoza, se identificaron 94 cauces, de los cuales el 74% son de primer orden, el 19% son de segundo orden, el 3 % de tercer orden, el 2 % de segundo orden y un único cauce de primer orden (Fig. 2d). La red de drenaje presenta una baja densidad, que junto al índice de textura indica que está conformada por material grueso de alta permeabilidad. Se consideró como cauce principal para el río Mendoza, el cauce de la zona de intercuenca más el cauce principal de la subcuenca del río Tupungato alcanzando los 172 km de longitud, con una pendiente media de 2%. El perfil longitudinal este cauce (Fig. 5) muestra que la pendiente de dicho cauce es mayor en los primeros 10 km desde la cabecera y a partir de allí continua con una pendiente menor. Los puntos de inflexión,

tanto en la curva hipsométrica como en el perfil longitudinal del río podrían asociarse a la actividad tectónica de la región o cambios litológicos.

Subcuencas de los ríos Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato

La cuenca del río Mendoza se dividió en las subcuencas de los ríos Las Cuevas, Las Vacas, Tupungato y una zona de intercuenca que comprende las subcuencas del río Uspallata (por la margen izquierda del río Mendoza) y de los ríos Blanco y del sector Cordón del Plata (por la margen derecha), esta zona de intercuenca comprende el área donde se origina el río Mendoza, hasta el punto de cierre de la cuenca en la estación de aforo Guido (Fig. 2d).

Las 3 subcuencas comprenden el 41% del área total de la cuenca del río Mendoza. La del río Las Vacas es la de menor superficie, ocupa un 8% de la superficie total de la cuenca del río Mendoza, le sigue la subcuenca del río Las Cuevas con un 9%, la del río Tupungato ocupa un 24%, mientras que la superficie de la zona de intercuenca representa un 59% del total. Los índices de forma indican que las 3 subcuencas se alejan de la forma del círculo, se aproximan a una forma rectangular-oblonga. En las cuencas con esta forma es característico que el flujo se intensifique en las desembocaduras y la onda de crecida puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal.

La subcuenca que posee la cota más alta es la del rio Las Cuevas mientras que la altura media es mayor en la del río Las Vacas, sin embargo, la subcuenca del río Tupungato es la que posee mayor pendiente media. En consecuencia, las velocidades de las corrientes de agua serán mayores y es más susceptible a procesos de erosión. De todas maneras, todas las subcuencas presentan pendientes medias características de un relieve muy fuerte según la clasificación de López Cadenas de Llano (1998). La orientación más frecuente en la subcuenca del río Las Cuevas son hacia el este (90°) y el oeste (250°). Las laderas de la subcuenca del río Las Vacas se orientan con mayor frecuencia hacia el noreste (70°) y suroeste (260°) al igual que en la subcuenca del río Tupungato (50° y 260°). Como se expresara anteriormente la asimetría de los valles es función de la orientación y exposición de las laderas producto de los procesos de congelamiento/descongelamiento, es así como las laderas oeste de la Quebrada Benjamín Matienzo (subcuenca del río Las Cuevas) presentan pendientes más abruptas respecto de las pendientes en la ladera este (Ahumada, 1986; Lauro, 2010).

En cuanto a la relación superficie de la cuenca y la altura, las cuencas del río Las Vacas y Tupungato son similares, mientras que el río Las Cuevas presenta un perfil más erosionado (Fig. 3). En las cuencas de régimen nivo-glaciar, resulta importante la superficie que se encuentra por encima/debajo de la de la isoterma de 0°C ya que por encima de la misma no habrá fusión y dependiendo de la estación del año habrá acumulación y por debajo habrá la ablación y por tanto escurrimiento. La isoterma anual de 0°C se estimó a los 3865 msnm en la zona del Cordón del Plata (Buk, 2002), según Drewes et al, (2018) dicha temperatura para los Andes Centrales se encuentra aproximadamente a los 3735 msnm. Para las cuencas de los ríos Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato dicha altura representa más de 50% de la superficie de las subcuencas (Fig. 4). Es decir, que más de la mitad de la superficie de las cuencas se encuentra expuesta a procesos de congelamiento y fusión.

Las subcuencas presentan un patrón de drenaje dendrítico. El número de cauces decrece conforme aumenta el orden de los cauces. Las cuencas del río Las Cuevas y Tupungato son de orden 3 y la cuenca del río Las Vacas es de orden 2.

Tanto las subcuencas como la cuenca del río Mendoza presentan una baja densidad de drenaje (0,19 a 0,24), esto revela que están compuestas de material subsuperficial permeable (textura de drenaje menor a 2), lo que da como resultado una mayor capacidad de infiltración en la cuenca hidrográfica. Dentro de esta condición la que presenta mayor proceso de erosión es la cuenca del río Las Cuevas ya que posee la mayor densidad de drenaje (0,24 km/km^2). Siendo la cuenca del río Tupungato la más permeable dado su valor alto de constante de mantenimiento.
En promedio la longitud del cauce principal de las subcuencas es de 64 km. En el perfil longitudinal de los cauces principales (Fig. 5) podemos observar que los cauces presentan pendientes más abruptas en la zona de la cabecera de las cuencas podría vincularse a al cambio del ambiente glaciar al periglaciar, en tanto, los cambios en los tramos medios podrían vincularse a control estructural. El río Las Vacas es el que presenta mayor pendiente 6%, los elevados valores de pendiente de los cauces se deben principalmente a las elevadas pendientes en el tramo cercano a la cabecera y el método de cálculo.

Tabla II: Parámetro morfomérticos calculados.

Parámetro	Unidad	Subcuencas			Cuenca
		Las Cuevas	Las Vacas	Tupungato	Mendoza
Au	km^2	672	565	1762	7350
Pu	km	168	169	283	653
L	km	61	56	71	167
C	---	0,30	0,25	0,28	0,22
E	---	0,48	0,48	0,67	0,58
Hmax	m	6900	6897	6531	6900
Hmin	m	2403	2366	2403	1414
DH	m	4497	4531	4128	5486
Hm	m	3956	4153	4077	3509
S	%	52,15	49,13	54,33	44,82
O	°	172	170	175	171
Lc	km	61	58	73	172
Sc	%	3	6	4	2
N_k^S	---	N3(9,3,1)	N2(6,1)	N3(18,4,1)	N5(70,18,3,2,1)
Dd	km/km^2	0.24	0.22	0.19	0.21
Ck	km^2/km	4.10	4.62	5.21	4.79
F	km^{-1}	0.02	0.01	0.01	0.01
Td		0.08	0.04	0.08	0.14

 ISBN 978-987-1323-66-1

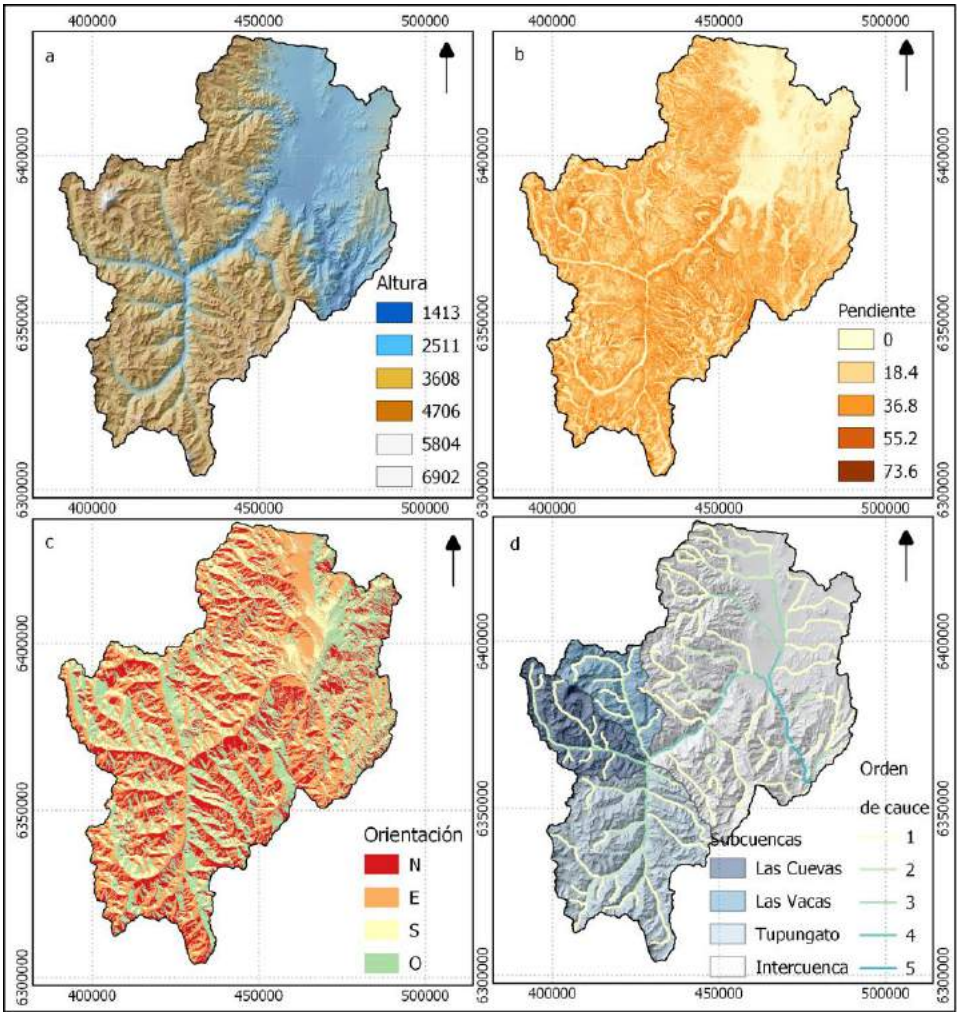


Figura 2: Mapas derivados del MDE para la cuenca del río Mendoza. **a-**Distribución altitudinal de la cuenca en metros sobre el nivel del mar. **b-**Mapa de pendientes expresada en grados. **c-** Mapa de orientación en grados respecto el norte. **d-** Subcuencas delimitadas y jerarquía de cauces según Strahler. Sistema de coordenadas UTM19S, WGS84.

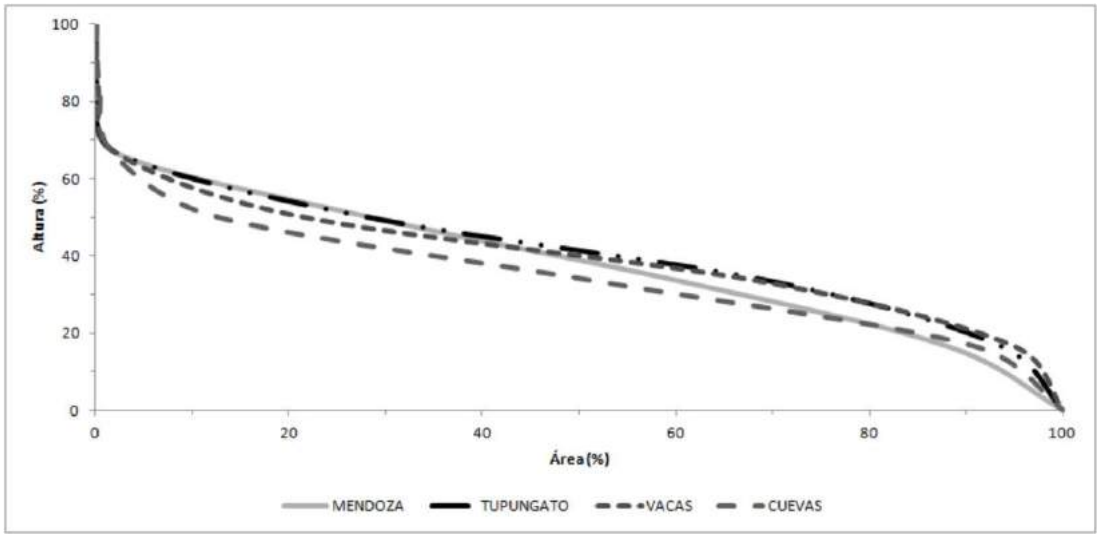


Figura 3: Curva hipsométrica en altura y áreas relativas.

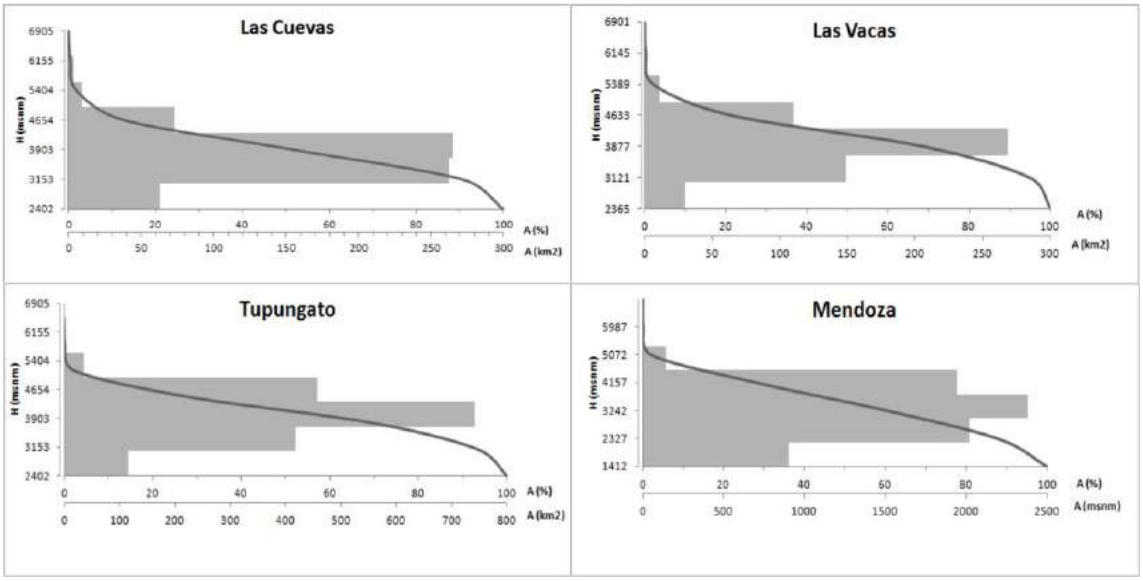


Figura 4: Curva hipsométrica y frecuencia de altura.

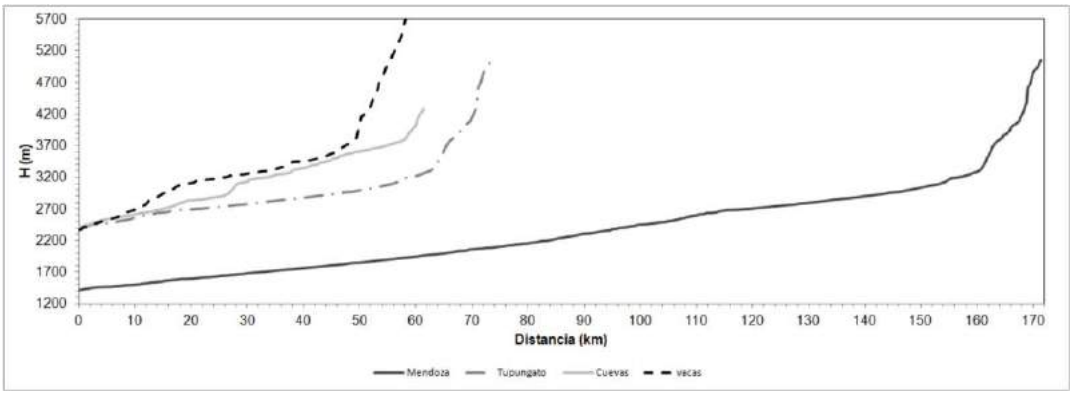


Figura 5: Perfil longitudinal del cauce principal de cada cuenca. Se considera como distancia cero el punto de aforo.

CONCLUSIONES

Las cuencas analizadas constituyen la principal fuente de agua del oasis norte mendocino, donde se localizan más de 1 millón de habitantes que utilizan el recurso hídrico para diversas actividades. El manejo de esta región para la conservación del recursos hídrico y de los servicios ambientales que brinda requiere de conocer la dinámica espacio temporal del escurrimiento superficial. Mediante el análisis de las características morfométricas se proporciona información para entender el comportamiento hidrológico de la cuenca del rio Mendoza y las sub cuencas del río Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato.

Si bien el río Mendoza se extiende hasta desembocar en el río Desaguadero, en el presente análisis se contempló únicamente la cuenca alta del río Mendoza y se definió como punto de cierre la estación de aforo Guido localizada aguas arriba del dique potrerillos. Como punto de cierre de las subcuencas se consideraron las estaciones de aforo sobre el río Las Cuevas, Las Vacas y Tupungato. De la superficie total de la cuenca de río Mendoza, la subcuenca del río Tupungato resultó ser la de mayor superficie, además aporta mayor caudal al río Mendoza y tiene una red de drenaje de orden mayor que el resto de las subcuencas. Todas presentaron una forma rectangular-

oblonga, este parámetro es un indicador de que ante un evento de precipitación el escurrimiento llega con cierto retardo a la desembocadura.
El relieve de la región es moldeado por procesos geológico estructurales, procesos geomorfológicos y climáticos, las pendientes elevadas contribuyen al origen de diversos procesos de erosión y remoción en masa, como así también a elevadas velocidades de escurrimientos.
La elevada pendiente de la curva hipsométrica del río Mendoza hacia el tramo final sugiere la presencia de un relieve menos acentuado respecto de la cabecera de la cuenca. Este aspecto del relieve podría vincularse con un control estructural, dado que la región es altamente influenciada por la actividad tectónica. Tanto en la cuenca del río Mendoza como en las subcuencas la densidad de drenaje es baja, es decir, que poseen una alta permeabilidad a esta propiedad también contribuye la presencia de material grueso.
La información generada es de utilidad para la modelación hidrológica, para determinar el escurrimiento, manejo de crecidas, zonas con procesos de erosión, zonas de captación de agua de lluvia, entre otros.

REFERENCIAS

Ahumada, A.L. *Procesos Criogenéticos y Mineralógicos en Qda. Matienzo Cord. Principal-Mendoza* (desde las nacientes del río Cuevas hasta la localidad de Cuevas). Tesis doctoral Facultad Ciencias Naturales UNT. (1986).

Alves, J.M.P.; Castro, P.T.A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 117-127, 2003

Buk, E. Hidrología de ambientes periglaciales. Cuenca morenas coloradas - Vallecitos, Cordón del Plata, Cordillera Frontal, Mendoza. En: *IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales*. Editores Trombotto D. y Villalba R. pp.165–169. ISBN: 987-43-4545-4 (2002).

Cardoso, C. A., Dias, H. C. T., Soares, C. P. B., Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, Rio de Janeiro., *Revista Árvore*, Vol.30, No. 2, 2006, pp. 241-248.

Cicacci, S.; Fredi, P.; Lupia, L.; Palmieri, L. y Pugliese, F. Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. In: Gardinier, V. *International Geomorphology*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., (1987).

Drewes, J.; Moreiras, S.; Korup, O. Permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes. *Geomorphology*, 323, pp. 18-24 (2018).

Endlicher, W., Instalación de parcelas de erosión para evaluar la erosion del suelo en la costa de chile central. *Tercer Congreso Geológico Chileno*. Concepción (1982)

Felicísimo, A.M. Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales 118 pp. http://www.etsimo.uniovi.es/ feli/pdf/libromdt.pdf (1994)

Gaspari F.J., Rodriguez Vagaría, A.M., Senisterra, G.E., Delgado, M.I. y Besteiro S.I. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. 1ed.- La Plata: *Universidad Nacional de la Plata*. E-Book. ISBN 978-950-34-0963-3 (2013)

Gregory, K. y Walling, D. Drainage Basin. Form and processes. A geomorphological approach. Kent, Arnold (1973).

Gregory, K. y Walling, D. Man and environmental processes. *A Physical Geography perspective.* London, Dawson (1979).

Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainaje basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bull*. 56: 275-280 (1945).

Hott, M.C., Furtado, A.L.S., Ribeiro, C.A.A. S., Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas, Sao Paulo., *Memorias*

del Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, pp. 3381-3388 (2007).
IGN. Modelo Digital de elevaciones de la República Argentina MDE-Ar (2014).
Inventario Nacional de Glaciares. Informe de las subcuencas de los ríos de las Cuevas y de las Vacas Cuenca del río Mendoza, provincia de Mendoza. *IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación* (2012a).
Inventario Nacional de Glaciares. Informe de la subcuenca del río Tupungato Cuenca del río Mendoza provincia de Mendoza. *IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación* (2012b).
Inventario Nacional de Glaciares. Informe de las subcuencas de los ríos Blancos y Sector del Cordón del Plata Cuenca del río Mendoza, provincia de Mendoza. *IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación* (2012c).
Inventario Nacional de Glaciares. Informe de las subcuencas del arroyo Uspallata y del sector Cordillera del Tigre Cuenca del río Mendoza, provincia de Mendoza. *IANIGLA-CONICET, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación* (2012d).
Köeppen, W. Climatología. Con un estudio de los climas de la Tierra. *Fondo de Cultura económica*. México DF–Buenos Aires. 496 pp (1948).
Lauro, C. *Estudio del origen y morfología de los paleo-represamientos de la quebrada Benjamín Matienzo, nacientes del rio de las cuevas, Mendoza*. Tesis de grado (2010).
Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S.M. 2016. Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Geoacta* 40(2): 28-51.
López Cadenas de Llano. *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España: 945 p. (1998).
Mármol, L. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. *Universidad Nacional de Salta*. ISBN 987-05-0569-4 (2008).
Moreiras, S.M, Lenzano M. G. y Riveros N. Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconcagua, provincia de Mendoza – Argentina. *Multequina vol.17 no.2 Mendoza jul./dic*. (2008).
Norte, F. *Características del Viento Zonda en la Región de Cuyo*. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. 255 pp. Disponible en el Programa Regional de Meteorología (PRM), Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales. (IANIGLA), Centro Científico Tecnológico (CCT), CONICET, Mendoza, Argentina. http://www.prmarg.org/tesis-doctorado. (1988)
Prohaska, F. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En .W. Schwerdtfeger, (ed.), *World Survey of Climatology*. Climates of Central and South America. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (1976).
Ramos,V. A. Geología de la región de Aconcagua, prov. de San Juan y Mendoza. *Anales. 24(I): 447-460* (1996).
Ramos, V. A., Las provincias geológicas del Territorio Argentino. En: *Geología Argentina*, R. Caminos (ed), Subsecretaria de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29, no 3 pp. 41–73. Buenos Aires (1999).
Strahler A. *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*. In: V. Chow, (Ed), Handbook of applied Hydrology, McGraw-Hill. New York, EE.UU (1964).
Vich, A.I.J. *Aguas continentales. Formas y procesos*. Manual de Aplicaciones prácticas. Mendoza. ZETA Editores (1999).

ANÁLISIS ESPACIAL DE LA DEGRADACIÓN EN FORMACIONES VEGETALES DE LA RESERVA PARA PARQUE NACIONAL SAN RAFAEL, PARAGUAY, PERIODO 2005- 2019

Llamas T, Villalba J, Amarilla S, Pérez De Molas L. y González L.

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, PARAGUAY.

e-mail: taniaallamas@gmail.com

RESUMEN

El objetivo general de la investigación fue analizar la degradación en formaciones vegetales de la Reserva para Parque Nacional San Rafael, Paraguay, durante el periodo 2005-2019. Esta Reserva, localizada en la Región Oriental del Paraguay, se constituye como uno de los remanentes boscosos más importantes de la Ecorregión Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA). Para el análisis fue utilizado el Índice de Fracción de Degradación Normalizada (NDFI), que fue ajustado en la plataforma Google Earth Engine y calculado para los años 2005, 2017 y 2019. Por otro lado, se realizó un análisis multitemporal de la degradación por la ocurrencia de 3 disturbios: un incendio forestal, un tornado y cultivos de carácter ilícito, utilizando el algoritmo de Detección Continua de Degradación (CODED), para el cual se consideraron 3 factores: las variaciones por pixel en los valores del índice NDFI antes, durante y después del disturbio registrado. El comportamiento multitemporal del índice con respecto a los disturbios analizados en el área de estudio demuestra que en términos de teledeteccion, la vegetación tiende a regenerarse post-disturbio, a menos que ocurran otras perturbaciones sucesivas de igual o mayor magnitud. Las propuestas de acciones de restauración realizadas en la investigación se constituirán como punto de partida para la planificación de acciones de manejo y conservación en el área.

Palabras Clave: degradación forestal, índice NDFI, Detección Continua de Degradación, Google Earth Engine.

INTRODUCCIÓN

A nivel país, se ha producido un aumento de la degradación forestal durante las últimas décadas (Portillo et al., 2008), principalmente por la sobreexplotación maderera para la obtención de leña y carbón vegetal, que son las principales fuentes de energía de las cuales depende más del 51% de los hogares paraguayos.

La Reserva para Parque Nacional San Rafael en el Paraguay, es considerada una de las principales prioridades de conservación, puesto que constituye una muestra representativa de la biodiversidad del BAAPA. Es muy probable que su riqueza florística se encuentre entre las más elevadas del país (Mattos & Peris, 2014), y se estima que las distintas formaciones vegetales, presentan todas algún grado de degradación debido a las actividades humanas. En ese contexto, el análisis espacial permite comprender los procesos que conducen a la fragmentación y degradación del recurso bosque, pudiendo analizar la dinámica de la cobertura vegetal a través del empleo de imágenes satelitales.

El objetivo general de la presente investigación fue analizar la degradación en formaciones vegetales de la Reserva para Parque Nacional San Rafael a través del Índice de Fracción de Degradación Normalizada, periodo 2005 - 2019, siendo los objetivos específicos: 1) calcular el índice NDFI para los años 2005, 2017 y 2019; 2) describir el comportamiento

multitemporal del índice con respecto a los principales disturbios registrados y 3) recomendar acciones de manejo para la restauración de formaciones boscosas degradadas.

MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en La Reserva para Parque Nacional San Rafael (RPNSR), que se encuentra ubicada en la Región Oriental de la República del Paraguay (ver Fig. 1), al norte del Departamento de Itapúa, a 380 km de la Ciudad de Asunción (Capital). La misma ocupa una superficie aproximada de 66.575 ha.

Se constituye como una de las Áreas Silvestres Protegidas más grandes de la Ecorregión BAAPA, y forma parte de una de las cuencas de reservorios de agua dulce más importantes, denominado acuífero Guaraní, con varios arroyos que irrigan la zona. Sus coordenadas centrales de ubicación son 26°26'57,17" de latitud sur y 55°42'58,43" de longitud oeste (Cacciali, 2013).

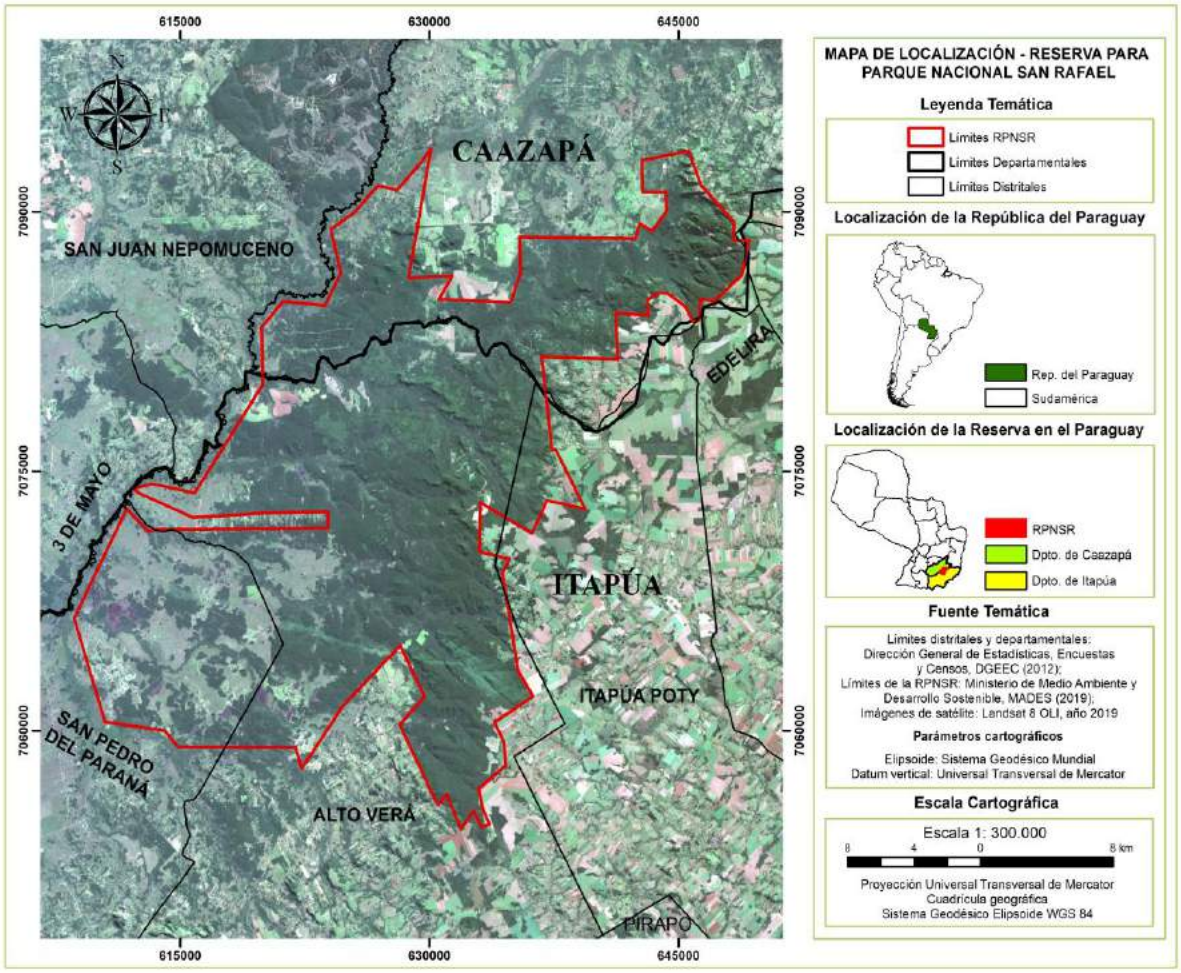


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio

Los datos utilizados corresponden a la colección de imágenes "Landsat L1T", disponibles en la plataforma Google Earth Engine. Esta colección posee una corrección basada en puntos de control, modelos digitales del terreno, y también una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve (Ariza 2013; Cabrera y López 2016). Los límites del área de estudio fueron obtenidos del Geoportal del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019), teniendo en cuenta que ésta es la institución encargada de la aplicación de la Ley 352 (1994), de Áreas Silvestres Protegidas.

Posteriormente, se realizó la adecuación y aplicación de un script desarrollado por Bullock et al. (2018), y la Universidad de Boston, Estados Unidos. En este procedimiento las imágenes Landsat utilizadas en el análisis se transformaron primeramente en fracciones de miembros finales que representan a las diferentes coberturas del suelo: la proporción Vegetación Activa (*GV*), Vegetación no fotosintéticamente Activa (*NPV*), Suelo y Sombra, que fueron adoptados de la metodología de Souza et al. (2005).

Estos a su vez se integraron según la metodología de (Souza et al., 2005), para el cálculo del Índice de Fracción de Degradación de Normalizada (NDFI), que consta de la siguiente fórmula:

$$\text{NDFI} = \frac{GV\ shade - (NPV + Suelos)}{GV\ shade + (NPV + Suelos)} \text{ donde } GV\ shade = \frac{GV}{100 + Shade}$$

Así también, se realizó un análisis multitemporal de los valores del índice NDFI a través del algoritmo de Detección Continua de Degradación (CODED), implementado por (Bullock et al., 2020), en la plataforma Google Earth Engine. Para ello, se consideraron 3 disturbios: incendios forestales ocurridos en el año 2005, un tornado ocurrido en el año 2017 y cultivos ilícitos establecidos hasta el primer semestre del año 2019. Los mismos fueron delimitados espacialmente con el software ArcGIS 10.3 ®.

Posteriormente, se seleccionó por disturbio un pixel que cubría un área total de 900 m^2 y se efectuó el análisis multitemporal, para el cual se consideraron 3 factores: las variaciones en los valores del índice antes, durante y después del disturbio registrado. Para este estudio, se considera que la vegetación ha sufrido daño al dosel y se encuentra degradada dentro del rango de valores de NDFI establecido por (Souza et al., 2005), que se encuentra entre 0 y 0,75.

Este rango de valores NDFI se definió empíricamente utilizando datos de daño del dosel recopilados mediante la realización de inventarios forestales y su correlación con valores reportados por el índice NDFI. Se seleccionó un periodo de tiempo para el análisis de cada perturbación. Ver Ec. (1).

Tabla 1. Periodo de análisis seleccionado para cada disturbio

Disturbios registrados	Año/s de ocurrencia	Periodo de análisis
Incendio Forestal	2005	2000-2005-2019*
Tornado	2017	2015-2017-2019*
Cultivos ilícitos	2019*	2010-2015-2019*
* El año 2019 solo fue considerado de forma parcial, de enero a junio.		

Finalmente, se realizaron propuestas de restauración de las formaciones boscosas degradadas en la RPNSR, de acuerdo a sus funcionalidades y las condiciones actuales de cada sitio. Las mismas fueron planteadas en conjunto con expertos relacionados al área de restauración forestal, teniendo en cuenta los principios fundamentales para la restauración ecológica según (Keenleyside et al., 2014), y las propuestas ya formuladas en el marco de investigaciones recientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo del Índice NDFI de la RPNSR, años 2005, 2017 y 2019.

Los resultados del índice NDFI dentro del periodo 2005-2019 (ver Fig. 2), indican la ocurrencia de disturbios que resultan en procesos de degradación continuos. Los puntos críticos con los valores de degradación más altos que se repiten para los 3 años corresponden a las zonas suroeste y noreste de la RPNSR, coincidentes con las áreas de mayor ocurrencia de incendios dentro del periodo 2000-2004 identificadas por (Delphin et al., 2005), y también con las zonas en las cuales se realizan actividades agropecuarias, tanto dentro de la RPNSR como en su área de amortiguamiento.

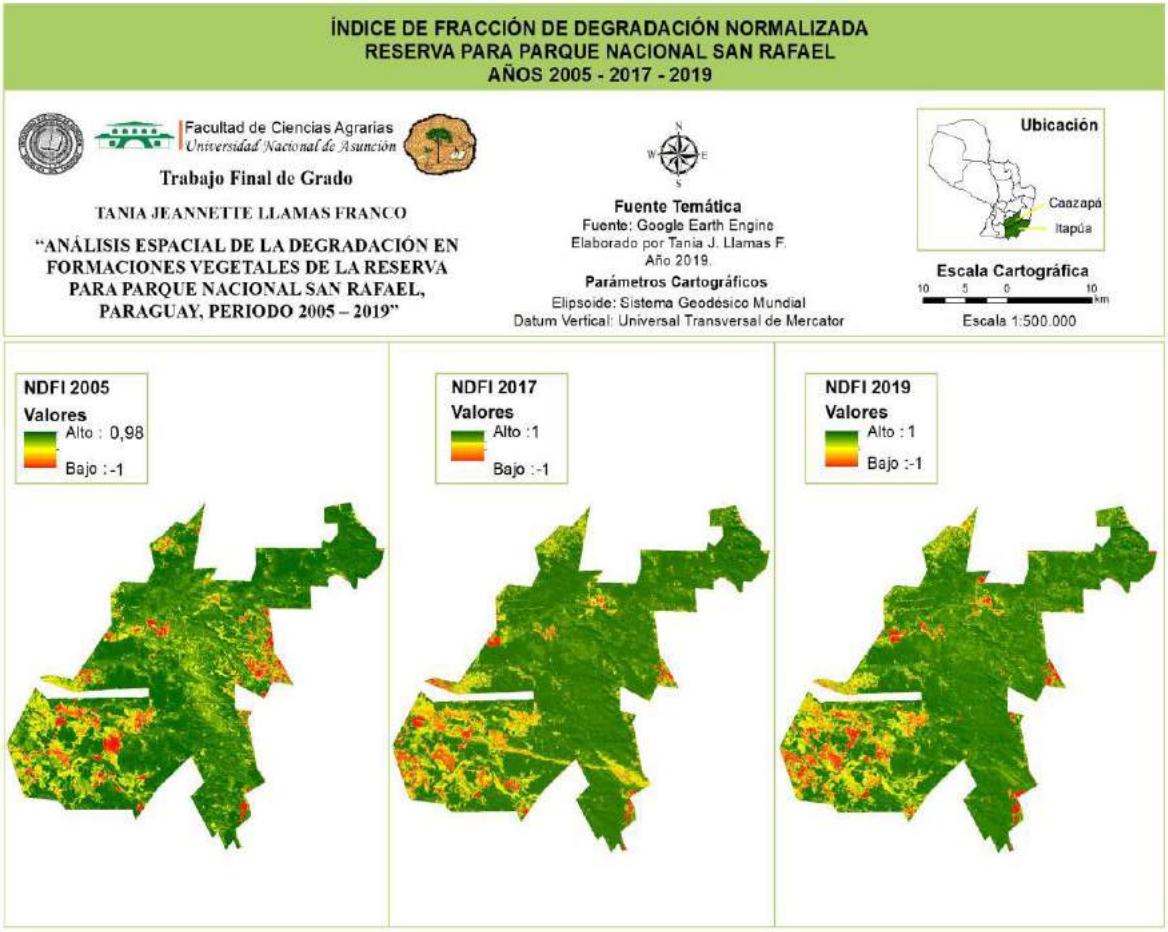


Figura 2. Índice NDFI de la RPNSR, periodo 2005-2019

La investigación realizada por (Insfrán et al., 2019), señala otro factor de degradación considerable: el cambio de uso de la tierra que, según el patrón de distribución espacial, forma y tamaño, corresponderían a actividades de carácter ilícito. Estos cambios se pueden apreciar con el índice NDFI a partir del año 2017.

En el año 2019 se observa un aumento de la superficie ocupada por cultivos ilícitos, y la zona norte de la RPNSR se clasifica como la más crítica, pues en ella se concentran mayoritariamente estos cultivos.

En la zona sur, en el año 2019 se puede observar una disminución de los valores de degradación registrados en el año 2017 por la ocurrencia del tornado, por lo cual se puede concluir que hasta el primer semestre del año 2019 se registró un favorable proceso de regeneración de la vegetación en la zona.

Comportamiento multitemporal de los valores del índice NDFI con respecto a los principales disturbios registrados

A continuación (ver Fig. 3), se observa la serie temporal de los valores del índice NDFI con respecto a los incendios forestales ocurridos en el año 2005.

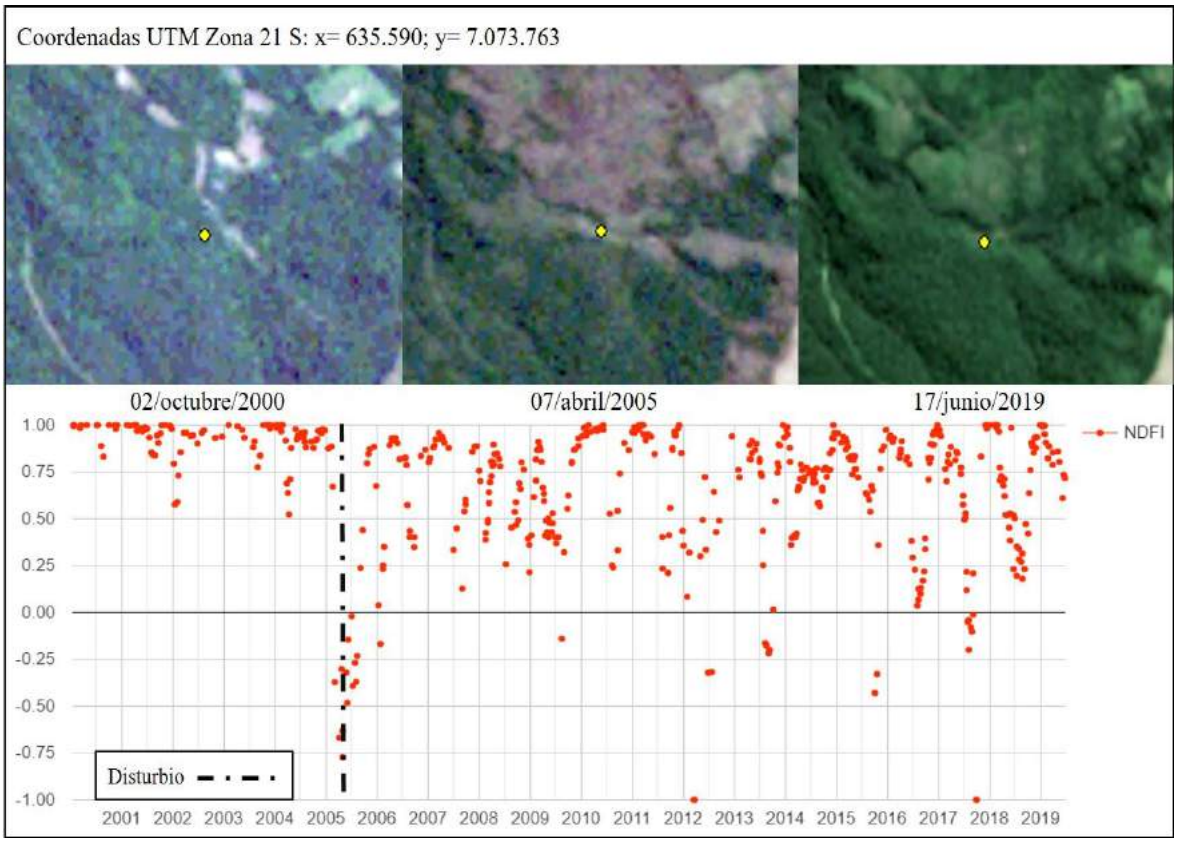


Figura 3. Respuesta temporal de un pixel sometido a degradación por la ocurrencia de incendios forestales, año 2005

Durante el periodo 2000 a 2004 el índice NDFI registra promedios anuales entre 0,86 a 0,97, indicando que la vegetación no reporta signos de encontrarse degradada. Para el mes de marzo de 2005, inmediatamente luego de la ocurrencia de los incendios, el valor mínimo que se reporta es de -0,38. Esto indica que la zona se encuentra muy degradada, ya que la disminución en los valores fue muy drástica con respecto a valores registrados para años anteriores y el rango considerado para el estudio.

Posteriormente, para el periodo 2006 a 2011, se registran valores anuales promedio entre 0,61 y 0,82, es decir, la vegetación se halla más recuperada en relación al año 2005. Para los meses de mayo de 2012 y septiembre del 2017, se registran valores mínimos de -1, indicando una gran magnitud de degradación. Los valores ascienden a partir del año 2018, y se obtiene un promedio de 1 para el primer semestre del año 2019.

Este comportamiento, sustentado en las observaciones satelitales de la zona, indican un proceso de regeneración de la vegetación boscosa, principalmente durante los últimos 2 años. (Vásquez-Grandón et al., 2018), señalan que las perturbaciones locales provocan que los bosques pasen por múltiples estados que dependen de la dinámica natural de la región y de la gravedad del cambio. Como los incendios forestales son disturbios dinámicos y

frecuentes dentro de la RPNSR, los bosques sujetos a los regímenes del fuego cambian constantemente, explicando las fluctuaciones en el comportamiento del índice para el pixel bajo estudio durante el periodo 2000-2019.

A continuación (ver Fig. 4), se observa la serie temporal de los valores del índice NDFI con respecto al tornado ocurrido en el año 2017.

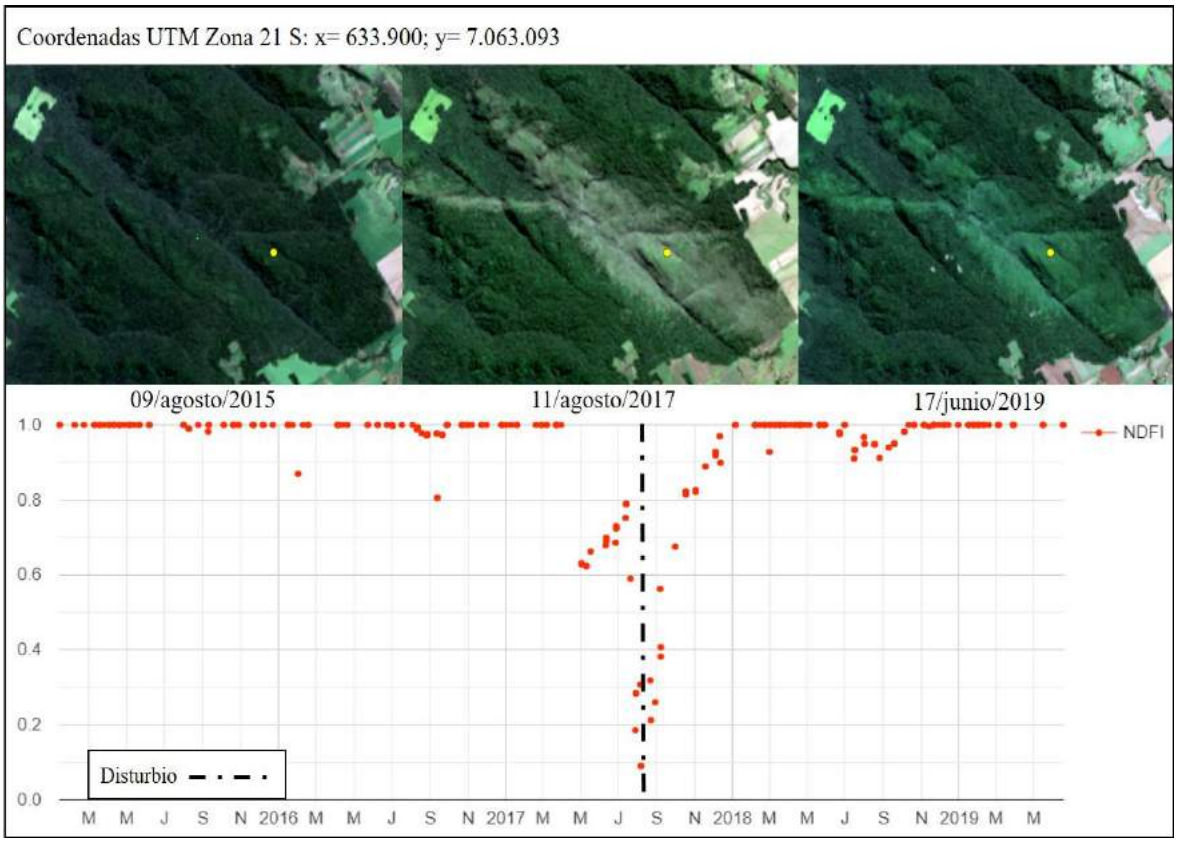


Figura 4. Respuesta temporal de un pixel sometido a degradación por la ocurrencia de un tornado, año 2017

En el periodo 2015-2016, los valores del índice se mantienen próximos a 1 y no se registran disturbios. A partir del mes de mayo del 2017 ocurre un descenso a un valor mínimo de 0,06, indicando que la zona se encuentra degradada como respuesta al disturbio ocurrido. Los meses de junio a setiembre son los más fluctuantes y la respuesta del índice varía significativamente. Durante el primer semestre del año 2019 se observa una vegetación recuperada, representada por valores promedio de 1.

Este comportamiento se sustenta en lo mencionado por (Vásquez-Grandón et al., 2018), que señalan que ciertos tipos de perturbaciones provocan que un ecosistema pase de un estado estable a inestable, pero si las perturbaciones no ocurran con frecuencia, el bosque tenderá a volver a su estado estable original a través de la sucesión.

A continuación (ver Fig. 5), se observa la serie temporal de los valores del índice NDFI con respecto a los cultivos ilícitos establecidos hasta el primer semestre del año 2019.

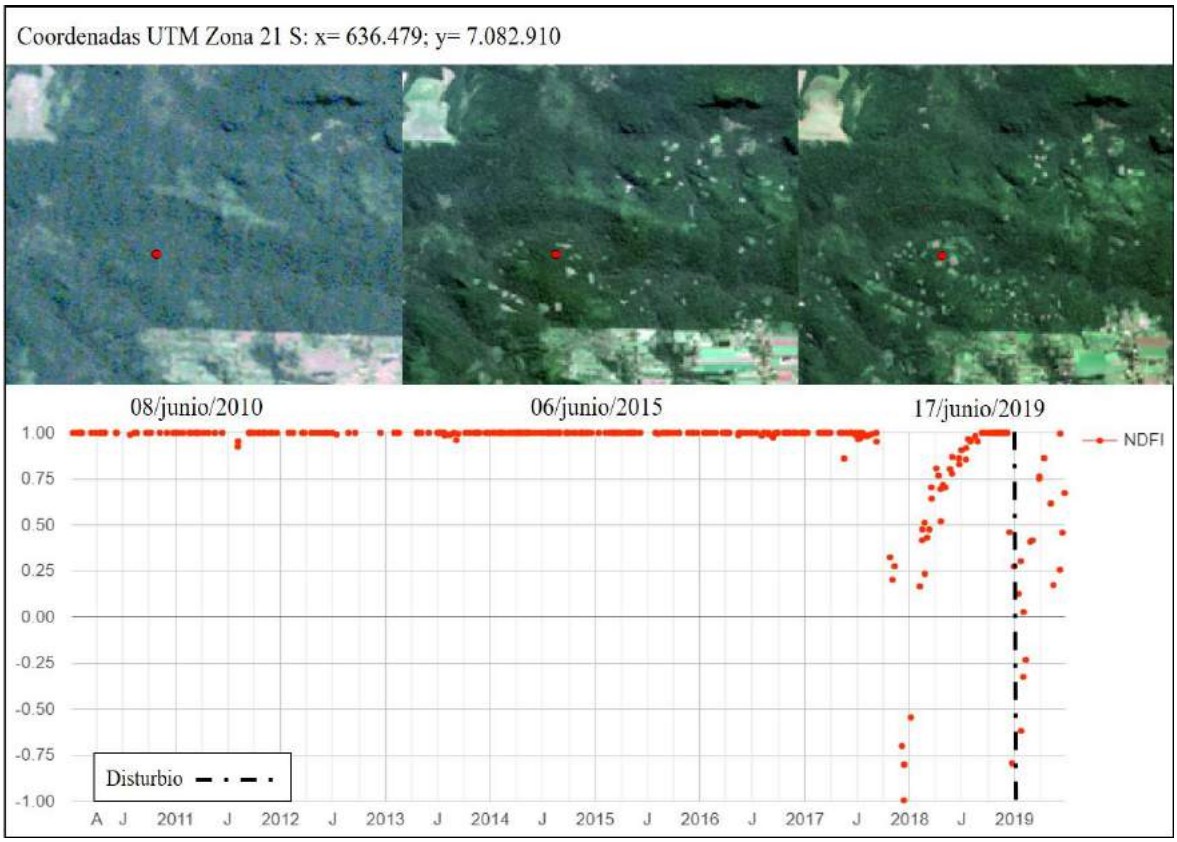


Figura 5. Respuesta multitemporal del índice NDFI con respecto a los cultivos ilícitos, año 2019

Se puede observar que en el periodo 2010 - 2017, el índice NDFI registra valores anuales promedio entre 0,86 y 1, por lo que la vegetación reporta signos de no encontrarse alterada. La primera disminución significativa en los valores del índice se observa durante el mes de octubre del año 2017, con un valor mínimo de -1. Posteriormente, a finales del mes de noviembre del año 2018, se detecta un nuevo descenso de los valores del índice a un mínimo de -0,76. La corroboración satelital (ver Fig. 6), permite atribuir este comportamiento a la fenología de los cultivos ilícitos de *Cannabis* sp.

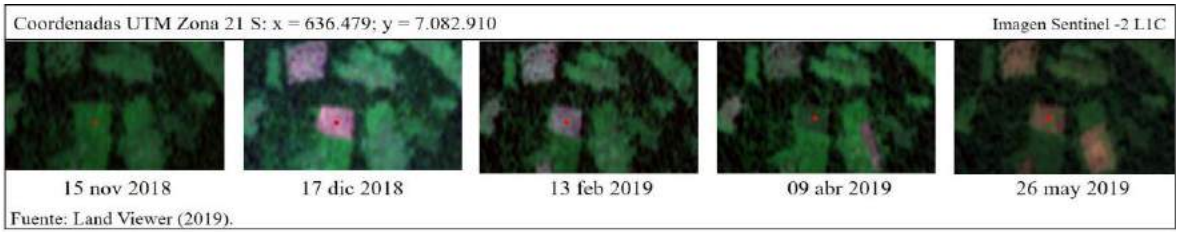


Figura 6. Fenología de los cultivos ilícitos de *Cannabis* sp. en la RPNSR año 2019

El ciclo productivo de *Cannabis* sp. (marihuana), dura aproximadamente 3 meses y comienza de los meses de octubre-diciembre, pues las condiciones de luminosidad y precipitación se vuelven óptimas. Se inicia con un proceso de quema controlada, justificando los valores tan bajos para el mes de diciembre del año 2018. Continúa con la siembra y el periodo de crecimiento de las plantas, tiempo durante el cual los valores aumentan por el aumento de la proporción de vegetación activa. La cosecha se realiza de

febrero a mayo, y esto sustenta la disminución de los valores del índice NDFI durante mayo del año 2019. El seguimiento temporal posterior arroja valores promedio de 0,27 para el mes de junio del año 2019, indicando que la zona se encuentra degradada.

Recomendaciones de acciones de manejo para restauración de formaciones boscosas degradadas

Para el año 2019, dentro de la clase de bosque "degradado", se identificaron las siguientes formaciones: Bosque Latifoliado SubTropical degradado, Bosque Latifoliado Subtropical Ribereño y Bosque Latifoliado SubTropical en Isletas. Teniendo en cuenta esta clasificación, se realizan las siguientes propuestas de manejo enfocadas a la restauración de las formaciones boscosas identificadas como degradadas:

Bosque Latifoliado Sub Tropical en isletas: esta clase se concentra principalmente al Suroeste de la RPNSR. Los bordes de los fragmentos de este tipo de bosque son vulnerables, en este caso, debido a la ocurrencia de incendios en áreas de pastizales. Por tanto, se recomienda realizar enriquecimiento en los bordes de los fragmentos e implementar mecanismos para excluir el ingreso del fuego, acordes a la situación particular.

Bosque Latifoliado Sub Tropical Degradado: esta clase se concentra principalmente al Norte y Sur de la RPNSR. Los resultados indican que estos bosques fueron afectados de manera recurrente por incendios forestales, extracción intensiva de especies maderables y fenómenos climáticos. Para los dos primeros casos se recomienda realizar intervención activa, y para el último caso, intervención pasiva. Esto implica:
- La implementación y/o fortalecimiento de programas de monitoreo y prevención de incendios;
- El enriquecimiento con especies nativas, considerando las que fueron extraídas del bosque y conducción de la regeneración natural.
- El manejo de la regeneración natural en la zona afectada por el tornado del año 2017, ya que, considerando que la zona afectada se encuentra rodeada por bosques, estos se constituyen en fuente de propágulos.

Bosque Latifoliado Sub Tropical ribereño: la Ley 422 (1973), menciona que los bosques protectores cumplen funciones de regulación del régimen hídrico, entre otros. También la Ley 4241 (2010), de "Restablecimiento de bosques protectores de cauces hídricos dentro del territorio nacional", destaca la relevancia de los mismos. La recomendación para esta formación consiste en la recuperación de los bosques protectores de ribera de acuerdo a la legislación vigente a nivel país.

Otras acciones que complementan el alcance y éxito de la restauración de las formaciones boscosas degradadas de la RPNSR se citan a continuación:

- Considerando la vigencia de la 2524 (2004) de "Prohibición en la Región Oriental de las actividades de transformación y conversión de superficies con cobertura de bosques" y que los cambios en la RPNSR actualmente se relacionan al establecimiento de cultivos ilícitos, se debe priorizar y reforzar el monitoreo, control y erradicación de los cultivos dentro del área por parte de las autoridades pertinentes.

- La implementación y/o fortalecimiento de programas que impulsen el desarrollo sostenible de las comunidades indígenas y locales tanto dentro de la RPNSR como en su área de amortiguamiento, como mecanismo para reducir la presión sobre los recursos forestales. Miranda (2018), menciona la importancia del fortalecimiento del trabajo en conjunto con las comunidades y la continuidad de iniciativas para dar valor agregado al bosque e implementar mecanismos para incentivar su conservación.

- Se observa incompatibilidad entre las actividades realizadas dentro de la RPNSR y los objetivos establecidos para la Categoría II "Parque Nacional". Teniendo en cuenta el enfoque multi categórico propuesto por (García Calabrese et al., 2018), la RPNSR se puede subdividir en: Categoría II "Parque Nacional" para las zonas con mayor cobertura boscosa, Categoría V de "Paisaje Protegido" para las zonas con comunidades indígenas y Categoría VI de "Uso Sostenible", para las zonas que son objeto de actividades por parte de los actores privados. Esto enmarcaría a la RPNSR dentro de un escenario de sostenibilidad.

- Fortalecer la presencia de la autoridad de Aplicación de las normativas legales (MADES) y su articulación con las instituciones que requieren de mayor apoyo para seguir ejecutando programas para la protección, conservación e investigación dentro la RPNSR. Esto responde a la poca presencia de la Autoridad de Aplicación y la insuficiente asistencia que reciben las organizaciones dedicadas a la conservación y que trabajan de manera local permanentemente (Amarilla, 2004); (Amarilla et al., 2019).

CONCLUSIONES

El Índice de Fracción de Degradación Normalizada, en conjunto con la interpretación visual de imágenes satelitales multitemporales y adaptaciones técnicas, permitió determinar los niveles de degradación que presentó la RPNSR durante el periodo 2005-2019 y así también, observar el comportamiento de las áreas afectadas en términos de degradación-regeneración durante el periodo de estudio.

De los 3 disturbios analizados con el algoritmo CODED, el incendio forestal del año 2005 y los cultivos ilícitos del año 2019 reportaron los valores de degradación más altos con el índice NDFI durante su ocurrencia. En el caso del tornado se reporta un proceso de regeneración activa hasta el primer semestre del año 2019 y en cuanto a los cultivos ilícitos de *Cannabis* sp., los resultados obtenidos con el índice NDFI permitieron identificar su ciclo fenológico y evidencian que estas actividades, son una de las principales causantes actuales de degradación en la RPNSR.

Así también, una vez que las propuestas de restauración realizadas en la investigación sean ejecutadas, deben ser constantemente monitoreadas, pues esto permitirá evaluar el grado de éxito de las mismas y en el caso de que sean poco efectivas y eficaces, redireccionar y ajustar las acciones planteadas con la finalidad de alcanzar los niveles de éxito esperados.

REFERENCIAS

Amarilla, S. M. (2004). Acceso y uso del recurso forestal y escenarios de sostenibilidad en la Reserva de Recursos Manejados San Rafael, Paraguay.

Amarilla, S. M., Villalba, J., & Yanosky, A. (2019). Social-ecological systems of Latin America: Complexities and challenges. *Social-Ecological Systems of Latin America: Complexities and Challenges*, *November*, 1–453. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28452-7

Ariza, A. (2013). Landsat Data Continuity Mission (LDCM). System, *November*.

Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 238(*November*), 0–1. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.011

Cabrera, F. & López, M. (2016). Viabilidad De Imágenes Landsat (Etm + Y Oli) Para La Determinación De Conflictos De Uso De La Tierra En El Cantón Portoviejo , Ecuador. *July*.

Cacciali, P. (2013). Diversidad y seleccíon de hábitat de la fauna de serpientes en Kangüery (área para Parque San Rafael). *Boletín Del Museo Nacional de Historia Natural Del Paraguay*, 17(1), 29–39.

García-Calabrese, M., Peralta, N., Valleau, V., Villalba, H., Wenninger, C., Zárate-Betzel, G., Amarilla, S.M., Villalba, J. (2018). América Latina en las últimas décadas: procesos y retos. *September*, 1318.

Delphin, S., Pinazzo, J., Huespe, H., Amarilla, S. M. (2005). Caracterización de Incendios a través de Imágenes Satelitales de Mediana y Alta Resolución en la Reserva de Recursos Manejados San Rafael y su zona de amortiguamiento, Región Oriental, Paraguay.

Insfrán, P., González, R., Ojeda, A., Villalba, J., & Amarilla, S. M. (2019). Caracterización de la degradación de la vegetación en la Reserva para Parque San Rafael, Paraguay y pautas generales para su restauración. *Paraquaria Natural*, 7(1), 34–42.

Keenleyside, K., Dudley, N., Cairns, S., Hall, C., Valentine, P., & De, E. (2014). Restauración Ecológica para Áreas Protegidas (Issue 18).

Ley Forestal n° 422. Instituto Forestal Nacional. Paraguay. 1973. 9 h.

Ley De Áreas Silvestres Protegidas n° 352. Paraguay. 1994. 18 h.

Ley De prohibición en la Región Oriental de las actividades de transformación y conversión de superficies con cobertura de bosques n° 2524. Art. 5. Ley de Deforestación 0. Paraguay. 2004. 2 h.

Ley De restablecimiento de bosques protectores de cauces hídricos dentro del territorio nacional n° 4241 (en línea). Art. 5. Instituto Forestal Nacional. Paraguay. 2010. 5 h.

Mattos, A. E., Peris, S., Vera, M. (2014). Flora de San Rafael Guía de árboles y arbustos comunes. *November*.

Portillo, L., Parra, A., Balbuena, C., Soto, C. (2008). Readiness Plan Idea Note The Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) (R-PIN) Uganda. 1–21.

Souza, C. M., Roberts, D. A., & Cochrane, M. A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 329–343. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.013

Vásquez-Grandón, A., Donoso, P. J., & Gerding, V. (2018). Forest degradation: When is a forest degraded? *Forests*, 9(11), 1–13. https://doi.org/10.3390/f9110726

DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE BAJO COSTO EMPLEANDO HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE

López Angulo C. A.[a], Scala F.[b] y Torrejón M. A.[c]

[a]*Profesorado de Grado Universitario en Geografía, FFYL, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[b]*Ingeniero Electromecánico*
[c]*Técnico Universitario en Geotecnologías, FFYL, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*

e-mail: albertolopez007@hotmail.com

RESUMEN

Las zonas urbanas en crecimiento se distinguen por niveles de contaminantes atmosféricos más elevados que en otras zonas, motivo de preocupación tanto para la población que habita estas zonas como para las autoridades de gobierno. Debido a los altos costos que conlleva el monitoreo de variables climatológicas y ambientales, dificultando llevar a cabo investigaciones, no solo en el campo de la meteorología, sino en otras ciencias, las tecnologías libres de licencia y patentes desarrolladas en comunidad aparecen como una oportunidad para pensar soluciones adaptadas a la disponibilidad y las necesidades locales en distintos ámbitos. Este proyecto propone desarrollar una herramienta tecnológica que permita estudiar el comportamiento de variables ambientales y climatológicas, permitiendo ahorro de recursos y una mejor evaluación del comportamiento de los microclimas. Presenta el desarrollo, construcción y adaptación de interfaces electrónicas para capturar los valores de los sensores, el proceso para la interpretación de los datos, así como los procedimientos estadísticos para determinar la relación entre los datos obtenidos por los sensores y los datos de las estaciones oficiales, la comparación con sistemas comerciales y las conclusiones obtenidas en el proceso.

Palabras Claves: variables, tecnología libre, estación meteorológica, herramienta, recursos.

INTRODUCCION

En los últimos años el crecimiento poblacional y económico de las ciudades, el desarrollo industrial y el aumento de vehículos en circulación ha provocado que se libere una gran cantidad de partículas que contaminan al aire. Diferentes estudios (Ballester, 2005) (Muñoz, 2007) señalan que ciudades con alta densidad de población se caracterizan por unos niveles de contaminantes en el aire más elevados que en otras zonas, lo que es actualmente motivo de preocupación tanto para los ciudadanos como las autoridades. En este sentido, destacar que niveles de contaminación ambiental considerados como moderados e inclusos bajos se asocian con efectos nocivos para la salud (Ballester, 2005).

En países europeos, EEUU y Japón es donde primero se han detectado los efectos nocivos de su desarrollo material en la salud del hombre y el ambiente. Es allí también donde se han tomado medidas para protegerlos y se han establecido los primeros estándares de calidad del aire. La evolución y la incorporación de técnicas y tecnologías de monitoreo ha permitido el seguimiento y control de estos estándares y, a la vez, su continua actualización.

Así, junto con los estándares, se han establecido métodos, denominados de referencia por la Environmental Protection Agency (EPA), que permiten asegurar la exactitud y precisión de los sistemas de monitoreo.

Sin embargo, establecer una red de monitoreo utilizando estos métodos, o sus equivalentes, tiene costos iniciales muy elevados y requiere de una cantidad significativa de recursos adicionales para el mantenimiento y la calibración. Es decir que, aún en estos países, existe la necesidad de complementar las costosas tecnologías de monitoreo con alternativas baratas y flexibles para poder incrementar la densidad de las redes de monitoreo (Mead, 2013).

La disponibilidad comercial de nuevos sensores de bajo costo y pequeñas dimensiones en el rango de los ppb ha permitido su evaluación e incorporación a sistemas de monitoreo desarrollados por universidades (Willett, 2010) (Elen, 2012) compañías privadas y comunidades DIY conectadas al movimiento de hardware abierto.

Debido a los altos costos que conlleva el monitoreo de variables climatológicas y ambientales, dificultando llevar a cabo investigaciones, no solo en el campo de la meteorología, sino en otras ciencias, las tecnologías libres de licencia y patentes desarrolladas en comunidad aparecen como una oportunidad para pensar soluciones adaptadas a la disponibilidad y las necesidades locales en distintos ámbitos.

Actualmente, gran parte de los esfuerzos por establecer y mantener estaciones de monitoreo son realizados por la comunidad científica que tropieza con las mismas limitaciones económicas de otros entes públicos y además carece de incentivos y reconocimiento formal por estas labores.

La idea de poder medir los parámetros atmosféricos viene dada por el deseo de todo geógrafo. En el mercado, las formas de hacer esto, son caras y, la condición de estudiantes, no permite adquirir estos equipos. Por lo tanto, a la idea de censar estos parámetros, se le suma la idea que este procedimiento sea fácil y barato. Para este cometido, se amalgaman los conocimientos propios del geógrafo con los de electrónica amateur del equipo que se conformó en su momento.

AREA DE ESTUDIO

Mendoza, como cualquier lugar en el mundo, tiene ciertas características climáticas que la distinguen. Por su ubicación latitudinal, podemos decir que es templada. Sin embargo, la presencia de la cordillera aporta rasgos áridos. La temperatura media en la llanura es de 15º C, con máximas que trepan hasta los 42º C y mínimas que descienden a los -5º C mientras que las lluvias que no superan los 200 mm anuales.

En la primavera llega desde el Este, con origen en el Océano Atlántico, la Sudestada. Mientras que en los meses del otoño e invierno y, a principios de la primavera, sopla uno de los vientos más característicos de la provincia, el viento Zonda. Los factores geográficos a gran escala, los 1.100 kilómetros que separan a nuestra provincia del Atlántico (y los respectivos Anticiclones) y los 170 Kilómetros -cordillera mediante- del Pacífico, vienen a ofrecer la explicación al porqué de los rasgos climáticos esenciales que predominan en nuestra tierra. De estos dos océanos, Mendoza recibe los efectos de los mencionados anticiclones, dos grandes generadores de vientos húmedos, uno del Atlántico Sur y otro del Pacífico Sur. El sistema se completa con la depresión del Noroeste, un centro ciclónico,

ubicado el noroeste de Argentina, que atrae las masas de aire húmedas, que mencionábamos, de los anticiclones oceánicos. (DGE, 2017).

La estación meteorológica de bajo costo se encuentra emplazada en la Provincia de Mendoza, ver Fig. 1, en el Departamento de Guaymallén, en una zona que combina lo rural con lo urbano. Para validar los datos generados, estos se correlacionan con los datos suministrados por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional emplazada en la Base Aérea que se encuentra dentro del Aeropuerto Internacional Argentina 2000 "El Plumerillo", zona donde predomina el hormigón y en lo que no hay una combinación de paisajes.

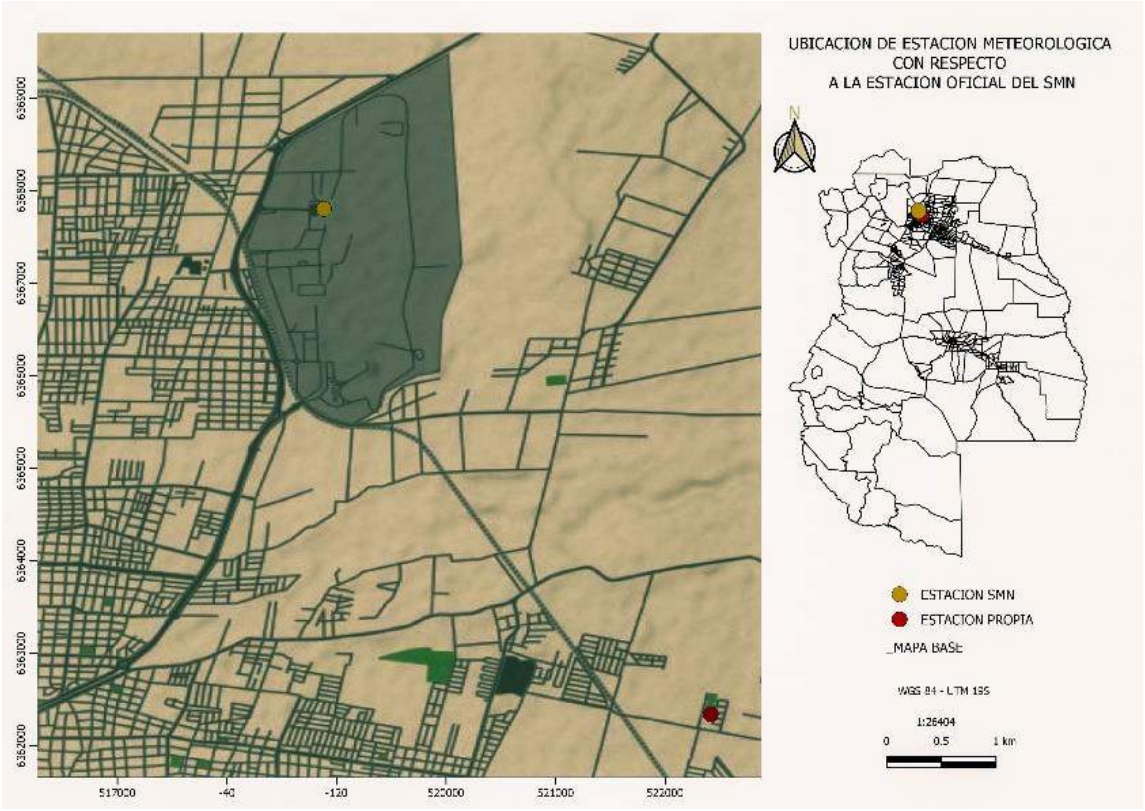


Fig.1. Área de estudio.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Particularmente, se le dio prioridad a hardware universal de bajo coste y software libre, evitando el pago de suscripciones, licencias y evitando sensores que sólo responden a una sola marca y/o lenguaje de programación. Amalgamiento de conocimientos propios de los integrantes del equipo, tanto de la rama geográfica, como de electrónica amateur.

Elección de software libre, bajo el entorno de programación C++. Hardware de bajo coste y alto rendimiento. Se optó por incorporar un microcontrolador y no sólo un microprocesador. La arquitectura general se describe en la Fig. 2. La energía es aportada por un panel solar, almacenada en baterías de litio y adaptada a los respectivos niveles con módulos step-up y step-down. Optar por materiales reciclados para la instalación física de la estación meteorológica, baja los costes y ayuda a la problemática de los desechos electrónicos.

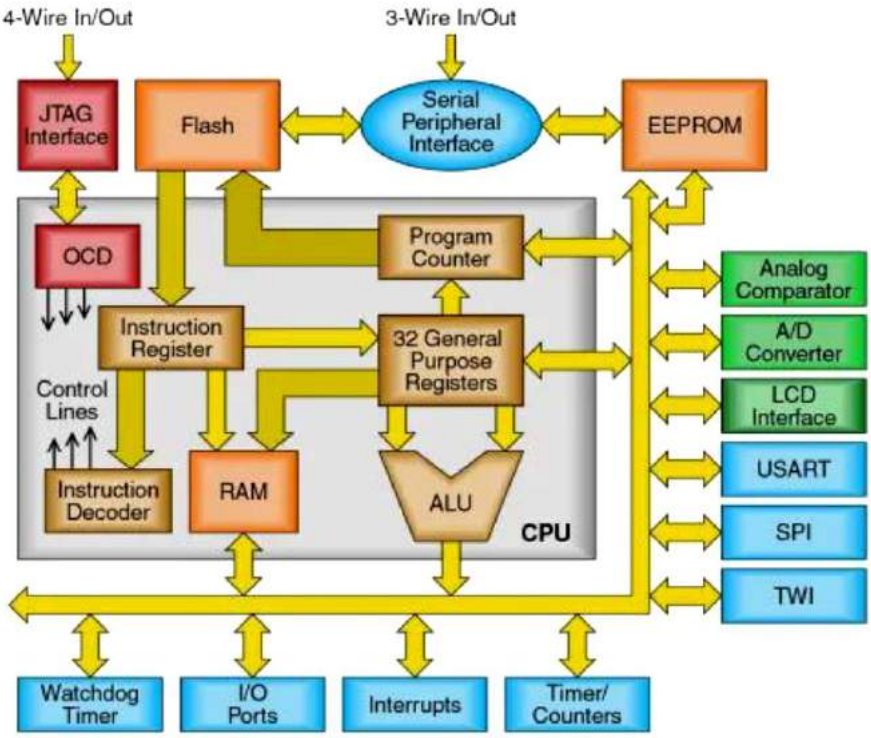


Fig. 2. Arquitectura general. Imagen extraída del manual de uso del fabricante.

Se seleccionó al atmega328p-pu como "cerebro" para procesar el sketch. El microprocesador Atmega328p-pu, ver Fig.3, tiene posee las siguientes características:

- Arquitectura de 8 bits AVR
- Memoria flash de 32kB
- Memoria SRAM de 2kB
- Memoria EEPROM de 1kB
- Soporta protocolos UART, SPI, I2C y OneWire
- Voltaje de operación de 5V
- Consumo menor a 1mA
- 14 E/S digitales
- 6 Salidas analógicas
- 6 salidas PWM



Fig. 3. Atmega328p-pu. Imagen extraída del manual de uso del distribuidor.

Entre los periféricos que se le adhirieron a este chip, el principal fue el DS3231. Este periférico es el que mantiene el tiempo constante, ver Fig.4 y actualizado, para poder ejecutar las ordenes en su horario correcto, así no se sufre de desfasajes cuando no está conectado el dispositivo a ninguna red. Se optó por un almacenamiento ver Fig. 5 en tarjeta MicroSD. Para esto, se utilizó un módulo especial que viene para eso.



Fig.4. MóduloDS3231(Reloj de alta precisión). Imagen extraída del manual de uso del fabricante.

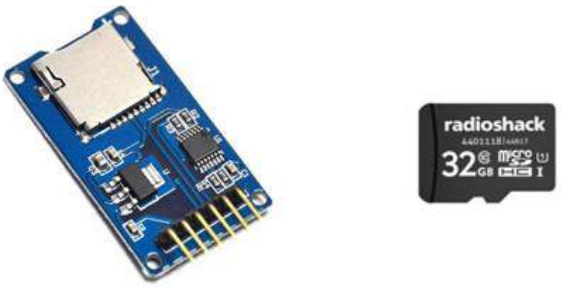


Fig. 5. Lecto/grabadora Micro SD. Imagen extraída del manual de uso del fabricante.

Los sensores utilizados fueron los siguientes:

- ✓ Temperatura (°C):
- DS18B20 con encapsulado cilíndrico de acero inoxidable;
- 2 x DS18B20 con encapsulado TO-092.
- ✓ Temperatura (°C) y Presión (hPa):
- BMP280.
- ✓ Temperatura (°C) y Humedad (%):
- HTU21D.
- ✓ Rayos UV (nivel como mW/cm2):
- ML8511.
- ✓ Luxómetro (lux):•BH1750.
- ✓ Sensor de gases (ppm):
- ✓ MQ-135:

- CO2.

✓ MQ-7:

- CO;
- H2;
- CH4;
- LPG;
- Alcohol (metanol, etanol y/o propanol).

✓ Sensor de polvo (µg/m3):

- Gp2y1014.

✓ Anemómetro (Km/h), Veleta, Pluviómetro (mm)/Pluviógrafo (mm/h) (en proceso)

Se colocaron dos "núcleos" independientes para asegurar la toma de datos fundamentales ante cualquier fallo y, también, para comprobar diferentes programas e intervalos de tomas de los parámetros ya mencionados. El "núcleo A" toma datos a las 0,4,8,12,16,20hs de temperatura, presión, humedad, CO, H2, LPG, CH4, LPG, alcoholes, rayos UV, lúmenes y particulado atmosférico. Indirectamente, se pueden calcular datos como punto de rocío, altura de nubes y evapotranspiración. El "núcleo B" toma datos cada dos horas, partiendo de las 0hs, de temperatura y CO2. Los dos núcleos graban sus datos en tarjetas microSD independientes. Las tarjetas se extraen, se descargan los datos en una PC y, por medio de programas de hojas de cálculo, se realizan las tablas y gráficos correspondientes.

El termómetro C (sensor DS18B20 encapsulado TO-092**)** está ubicado en la caja estanca exterior-superior. Esta caja tiene un contacto nulo (o casi nulo) de aire con el exterior. Lo que sí, a esta caja le da el sol todo el día, incluso, al ser la que tiene la tapa de vidrio, los rayos penetran en su interior. Hay que destacar que, ninguno de los sensores que comparten la caja con el termómetro C, levantan temperatura para su funcionamiento.

Los termómetros A (HTU21D), B (BMP280) y D (sensor DS18B20 encapsulado TO-092) están ubicados en la caja semi-estanca exterior-inferior. Esta caja tiene un intercambio de aire con el exterior prácticamente perfecto, no así con el agua cuando llueve. A esta caja no le da el sol en ningún momento del día, Hay que destacar que, dos de los sensores MQ-135 y MQ-7, que están próximos (2,5cm aproximadamente), levantan temperatura continuamente (entre 18°C y 22°C).

El termómetro del Núcleo B (sensor DS18B20 encapsulado cilíndrico de acero inoxidable) está ubicado en el exterior y los rayos de sol solo le dan entre las 11.45 y 15.35.

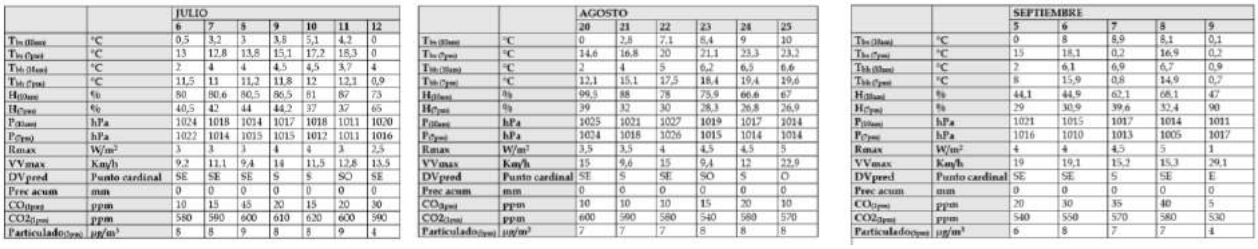
En los termómetros C, D y el del Núcleo B (sensores DS18B20 ambos tres) cuando vemos que arrojan las temperaturas -127°C o 127°C es que en el instante que se le "solicita" la temperatura, la resistencia pull-up esta fuera de ciclo. No es una falla ni nada por el estilo, es simplemente un lapsus de intervalo de la parte electrónica.

RESULTADOS

Los datos de temperatura, humedad y presión se correlacionaron con los datos de la estación del SMN, el resto de los datos no pudieron ser correlacionados al no poder encontrarse

estaciones que generaran los mismos datos, los cuales en el futuro se compararan con datos generados por satélites.

La estación empezó a funcionar en el año 2019 ver Fig.6 y para el año 2020, los datos de la estación se compararon con los datos suministrados por la estación meteorológica oficial ver Fig.7 denominada MENDOZA AERO del Servicio Meteorológico Nacional.



		JULIO						
		6	7	8	9	10	11	12
$T_{bh\,(10cm)}$	°C	0,5	3,2	3	3,8	5,1	4,2	0
$T_{bs\,(2cm)}$	°C	13	12,8	13,8	15,1	17,2	18,3	0
$T_{bh\,(10cm)}$	°C	2	4	4	4,5	4,5	3,7	4
$T_{bh\,(2cm)}$	°C	11,5	11	11,2	11,8	12	12,1	0,9
$H_{(10cm)}$	%	80	80,6	80,5	86,5	81	87	73
$H_{(2cm)}$	%	40,5	42	44	44,2	37	37	65
$P_{a(10cm)}$	hPa	1024	1018	1014	1017	1018	1011	1020
$P_{(2cm)}$	hPa	1022	1014	1015	1015	1012	1011	1016
Rmax	W/m²	3	3	3	4	4	3	2,5
VVmax	Km/h	9,2	11,1	9,4	14	11,5	12,8	13,5
DVpred	Punto cardinal	SE	SE	SE	S	S	SO	SE
Prec acum	mm	0	0	0	0	0	0	0
$CO_{2(10cm)}$	ppm	10	15	45	20	15	20	30
$CO2_{(2cm)}$	ppm	580	590	600	610	620	600	590
$Particulado_{(10cm)}$	µg/m³	8	8	9	8	8	9	4

		AGOSTO					
		20	21	22	23	24	25
$T_{bs\,(10cm)}$	°C	0	2,8	7,1	8,4	9	10
$T_{bs\,(2cm)}$	°C	14,6	16,8	20	21,1	23,3	23,2
$T_{bh\,(10cm)}$	°C	2	4	5	6,2	6,5	6,6
$T_{bh\,(2cm)}$	°C	12,1	15,1	17,5	18,4	19,4	19,6
$H_{(10cm)}$	%	99,5	88	78	75,9	66,6	67
$H_{(2cm)}$	%	39	32	30	28,3	26,8	26,9
$P_{a(10cm)}$	hPa	1025	1021	1027	1019	1017	1014
$P_{(2cm)}$	hPa	1024	1018	1026	1015	1014	1014
Rmax	W/m²	3,5	3,5	4	4,5	4,5	5
VVmax	Km/h	15	9,6	15	9,4	12	22,9
DVpred	Punto cardinal	SE	S	SE	SO	S	O
Prec acum	mm	0	0	0	0	0	0
$CO_{2(10cm)}$	ppm	10	10	10	15	20	10
$CO2_{(2cm)}$	ppm	600	590	580	540	580	570
$Particulado_{(10cm)}$	µg/m³	7	7	7	8	8	8

		SEPTIEMBRE				
		5	6	7	8	9
$T_{bs\,(10cm)}$	°C	0	8	8,9	8,1	0,1
$T_{bs\,(2cm)}$	°C	15	18,1	0,2	16,9	0,2
$T_{bh\,(10cm)}$	°C	2	6,1	6,9	6,7	0,9
$T_{bh\,(2cm)}$	°C	8	15,9	0,8	14,9	0,7
$H_{(10cm)}$	%	44,1	44,9	62,1	68,1	47
$H_{(2cm)}$	%	29	30,9	39,6	32,4	90
$P_{a(10cm)}$	hPa	1021	1015	1017	1014	1011
$P_{(2cm)}$	hPa	1016	1010	1013	1005	1017
Rmax	W/m²	4	4	4,5	5	1
VVmax	Km/h	19	19,1	15,3	15,3	29,1
DVpred	Punto cardinal	SE	SE	S	SE	E
Prec acum	mm	0	0	0	0	0
$CO_{2(10cm)}$	ppm	20	30	35	40	5
$CO2_{(2cm)}$	ppm	540	550	570	580	530
$Particulado_{(10cm)}$	µg/m³	6	8	7	7	4

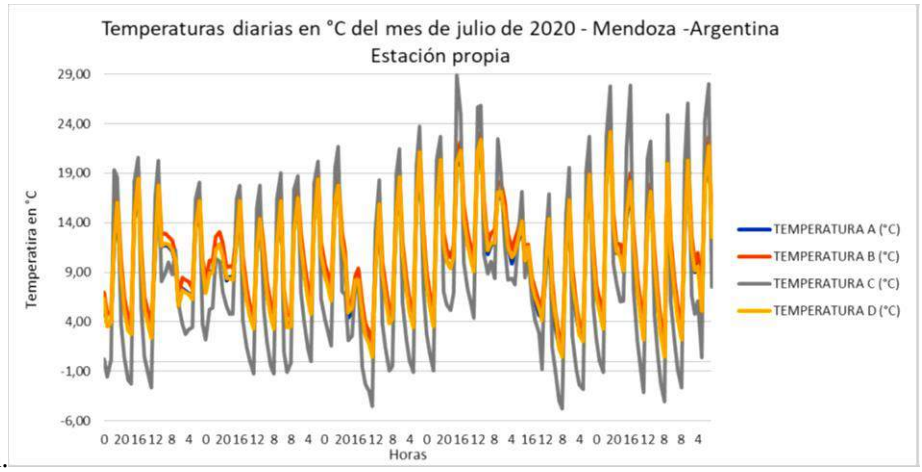
Fig. 6. Datos generados por la estación propia. Año 2019.

FECHA	HORA [HOA]	TEMP [ºC]	HUM [%]	PNM [hPa]	DD [gr]	FF [km/hr]	NOMBRE
26052020	0	10.4	60	1020.0	230	6	MENDOZA AERO
26052020	1	10.0	57	1019.3	230	4	MENDOZA AERO
26052020	2	9.6	56	1018.9	230	4	MENDOZA AERO
26052020	3	9.0	60	1018.8	180	4	MENDOZA AERO
26052020	4	8.4	61	1017.4	230	7	MENDOZA AERO
26052020	5	7.6	63	1017.0	230	4	MENDOZA AERO
26052020	6	7.0	67	1016.5	230	6	MENDOZA AERO
26052020	7	6.4	72	1016.6	230	4	MENDOZA AERO
26052020	8	4.8	70	1016.7	0	0	MENDOZA AERO
26052020	9	5.6	74	1017.0	0	0	MENDOZA AERO
26052020	10	11.6	54	1015.9	0	0	MENDOZA AERO
26052020	11	15.2	29	1015.6	0	0	MENDOZA AERO
26052020	12	17.8	27	1014.5	0	0	MENDOZA AERO
26052020	13	19.8	24	1013.2	50	7	MENDOZA AERO
26052020	14	21.0	20	1011.9	20	15	MENDOZA AERO
26052020	15	22.4	19	1010.4	20	13	MENDOZA AERO
26052020	16	22.6	22	1009.6	20	9	MENDOZA AERO
26052020	17	22.6	20	1009.5	360	13	MENDOZA AERO
26052020	18	22.0	32	1009.3	0	0	MENDOZA AERO
26052020	19	18.1	43	1010.1	0	0	MENDOZA AERO
26052020	20	15.8	41	1011.0	230	9	MENDOZA AERO
26052020	21	14.4	49	1011.2	230	7	MENDOZA AERO
26052020	22	12.2	54	1011.1	110	4	MENDOZA AERO
26052020	23	11.2	55	1011.2	230	7	MENDOZA AERO

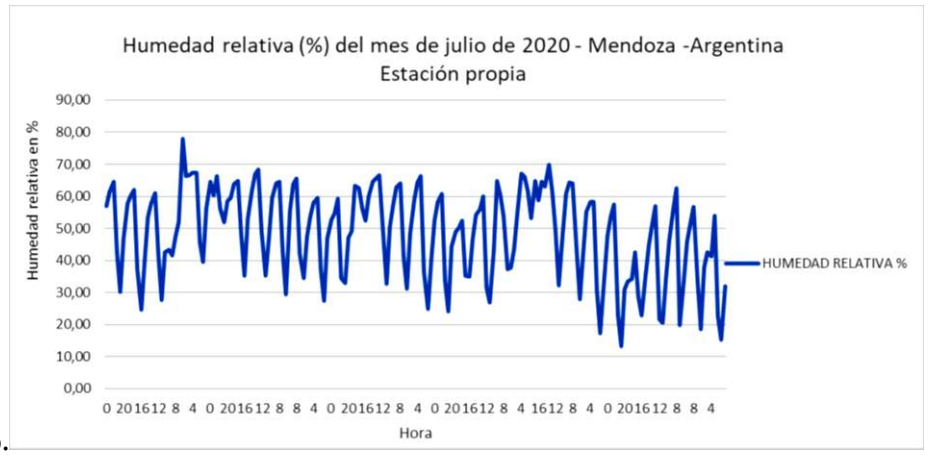
Fig. 7. Fragmento de los datos adquiridos por la EM del SMN.

Datos diarios generados por Estación Propia del mes de julio del 2020 a las 0, 4, 8,12, 16 y 20 hs ver Fig. 8.

a.



b.



c.



Fig.8. Datos generados por estación propia, gráficos a, b y c.

Los diagramas de dispersión, ver Fig. 9, al comparar datos de la estación del SMN con la Estación Propia, a las 0, 4, 8,12, 16 y 20 hs, arrojaron buenos resultados.

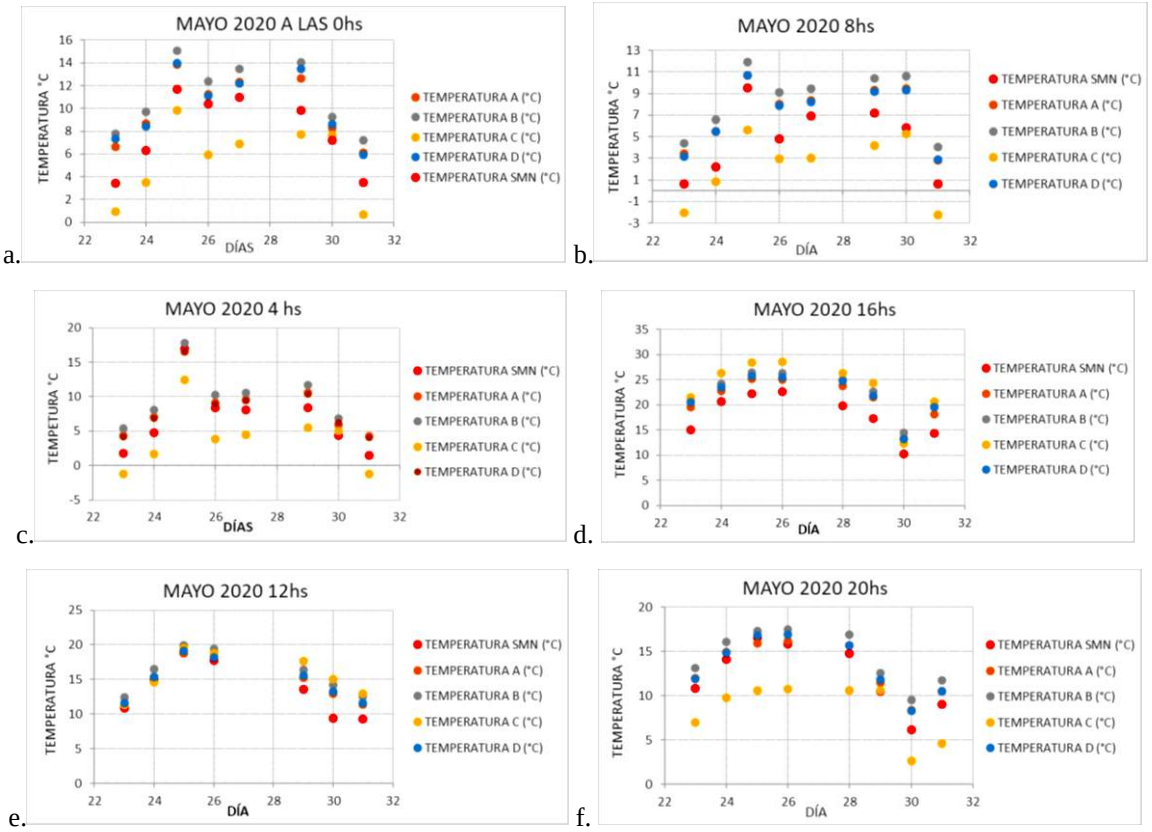


Fig. 9. Datos del mes de mayo, gráficos a, b, c, d, e y f.

El coeficiente ver Fig.10 de correlación arrojo valores por arriba de 0,9, demostrándose que los datos generados por la estación propia son válidos.

Coeficiente de correlación global mayo 2020 Datos tomados de los sensores vs datos del SMN	
Temperatura A (°C)	0,977
Temperatura B (°C)	0,977
Temperatura C (°C)	0,917
Temperatura D (°C)	0,972
Humedad R. (%)	0,967
Presión (hPa)	0,987

Coeficiente de correlación global julio 2020 Datos tomados de los sensores vs datos del SMN	
Temperatura A (°C)	0,960
Temperatura B (°C)	0,960
Temperatura C (°C)	0,869
Temperatura D (°C)	0,960
Humedad R. (%)	0,957
Presión (hPa)	0,980

Coeficiente de correlación global junio 2020 Datos tomados de los sensores vs datos del SMN	
Temperatura A (°C)	0,935
Temperatura B (°C)	0,935
Temperatura C (°C)	0,859
Temperatura D (°C)	0,149
Humedad R. (%)	0,946
Presión (hPa)	0,984

DATOS NUCLEO B

Coeficiente de correlación global julio 2020 Datos tomados de los sensores vs datos del SMN	
Temperatura (°C)	0,942
CO2 (ppm)	

Fig.10. Datos del mes de mayo de la estación propia correlacionados con la estación del SMN.

CONCLUSION

El avance tecnológico que ha sufrido la investigación científica, en los últimos 50 años, no tiene parangón con ninguna época pasada del ser humano. Las "nuevas tecnologías"

avanzan vertiginosamente día a día y, como resultado, nos acercan la realidad de cada milímetro del mundo, bombardeando nuestros sentidos continuamente.

La experiencia que se obtuvo, obtiene y obtendrá de trabajar con este tipo de plataformas es sumamente enriquecedora. Es valiosa a muchos niveles porque no sólo se valora el dato, sino la forma de obtención del mismo.

Una de las cosas que identifica a este proyecto es su versatilidad y la capacidad de mutar para encajar exactamente en nuestros requerimientos.

Otra característica importante, es la adaptabilidad para trabajarse a diferentes niveles, tanto secundarios, universitarios, doctorales y amateurs. Esto, posibilita que, cualquier sea el interesado, pueda participar activamente tanto en el armado, la programación y la puesta a punto de una estación meteorológica.

La versatilidad, la capacidad de mutar y el sistema en bloques que se ideó para su implementación, permite realizar cualquier requerimiento, tanto nuestro como de terceros. Se logra una autonomía prácticamente infinita con energías alternativas (solar en este caso) y una obtención y guardado del dato de extrema fiabilidad y confianza. El reciclaje de todos los materiales que tienen que ver con la estructura y montaje, es posible y arroja resultados óptimos. La comprobación de los datos, desde el punto de vista estadístico-matemático, fue bastante exitosa, arrojando porcentajes de diferencia promedio, con respecto a la estación meteorológica del SMN más cercana, menores al 8%.

La construcción de estaciones de monitoreo de bajo costo, viene a proporcionar una herramienta de enorme relevancia, donde la sociedad en conjunto puede intercambiar información y aprender en consecuencia, convirtiéndose en un aliado clave a la hora de planificar e implementar proyectos de adaptación y alerta temprana.

REFERENCIAS

Ballester, F. (2005). El proyecto EMECAS: protocolo del estudio multicéntrico. Especialidad Salud Pública, pp. 229-242.

Muñoz D., A. M. (2007). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de adultos que laboran en diferentes. Fac. Nac. Salud Pública, vol. 2, n° 25, pp. 85-94.

Mead, M.I. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. Atmospheric Environment.

Willett, W. (2010). Common Sense Community: Scaffolding Mobile Sensing and Analysis for Novice Users. Proc. Pervasive 2010, 301-318,

Elen, B. (2012). The EveryAware SensorBox: a tool for community-based air quality monitoring. In Proceedings of the Sensing a Changing World Workshop.

Dirección General de Escuelas. (2017). Programa Memorias de la Localía. Miradas de Mendoza. Portal educativo de la Provincia de Mendoza, en: https://institutodelbicentenario-infd.mendoza.edu.ar/aula/archivos/repositorio/1000/1187/Modulo_3_Geo.pdf

Arduino, en: www.arduino.cc

Recursos electrónicos, en : www.datasheet.com

DISTRIBUCIÓN AREAL DE ATRAZINA Y MODELACIÓN DE SU TRANSPORTE HACIA EL ACUIFERO LIBRE EN UNA PLANICIE FLUVIO-EÓLICA

Lutri V.[ab], Blarasin M.[b], Matteoda E.[b], Giacobone D [ab]., Becher Quinodoz. F[b], Cabrera A.[b], Giuliano Albo J. [b] *y* Bachetti R. [c]

[a]*CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Geologia, Facultad de CEFQyN, Universidad Nacional de Rio Cuarto,Cba., ARGENTINA*
[c]*Universidad Nacional de Villa Maria.Cba. ARGENTINA*

e-mail: verolutri@gmail.com

RESUMEN

La zona de estudio se extiende al sur del río Ctalamochita, desde la vertiente oriental de Sierra de Las Peñas y Los Cóndores, hacia la llanura fluvioeólica adyacente (350.000 ha) en la provincia de Córdoba (Arg.). La actividad predominante es agrícola, con dominio de soja, maíz y trigo, con prácticas de siembra directa e intenso uso de agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes). El objetivo del presente estudio es analizar la distribución espacial de atrazina en el agua subterránea del acuífero libre, analizando los factores hidrogeológicos relacionados. Se realizó también la modelación numérica del transporte de atrazina en la zona no saturada para discernir los procesos principales que contribuyen a su llegada al acuífero. Se procesaron 33 muestras de agua del acuífero libre y atrazina fue detectada en 5 muestras (14,7 % del total), en concentraciones de 0,14 a 1,26 µg/L. Los resultados permitieron definir que, para similares actividades de uso, la variable permeabilidad de la zona no saturada y la profundidad del nivel freático condicionaron en diferente grado la llegada del contaminante. La modelación numérica reveló que el transporte de agua y atrazina se produce tanto por microporos en forma continua como por macroporos en menor medida y en forma episódica (flujo preferencial por grietas, huecos de raíces, etc,). El flujo por macroporos está ligado a los periodos de más precipitaciones (septiembre a marzo) que además permiten el transporte de mayores tasas de solutos. El suelo es donde se encuentran las mayores concentraciones de herbicidas aunque el agua subterránea pasó a ser un subsistema ambiental en el que aparece actualmente el herbicida, por transferencia debida a transporte advectivo/dispersivo/reactivo. Si bien los valores son bajos, demuestran el impacto al sistema natural. Por ello, el mismo debe ser monitoreado en el tiempo para conocer su evolución, su variación estacional e incluso interanual.

Palabras Clave: Acuífero libre, Contaminación, Transporte, Herbicida.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento mundial de la producción agrícola se ha logrado principalmente mediante el uso intensivo de insumos agrícolas como plaguicidas y fertilizantes químicos. La contaminación resultante presenta riesgos demostrados para los ecosistemas acuáticos, la salud humana y las actividades productivas (PNUMA, 2016). Argentina ocupa el tercer lugar mundial en el uso de herbicidas (Pretty y Bharucha, 2015). Atrazina es uno de los herbicidas más empleados a nivel mundial y ha sido detectado en cuerpos de agua superficial y subterránea en España (Sanchez Camazano

et al., 2005), Portugal (Silva et al., 2012), Estados Unidos (DeSimone et al., 2015) y Argentina (Bachetti et al., 2013, 2015, Becher Quinodóz et al., 2013, Lutri et al., 2016,2018; García et al., 2019). Debido a que este herbicida se asocia con una relativamente elevada toxicidad crónica y potencial de acumularse como sustancia recalcitrante en agua superficial y subterránea, está restringido actualmente su uso en los Estados Unidos de América y ha sido prohibido en varios países de la Comunidad Europea (Hansen et al., 2013).

Para el año 2017 la base de datos de FAO (FAOSTAT) indica que Argentina es el tercer país luego de estados Unidos y Brasil en el ranking de uso de herbicidas y atrazina es el segundo herbicida más utilizado, luego del glifosato, para el año 2012 (CASAFE, 2012). En nuestro país se aplica en forma extensiva en el cultivo de maíz y sorgo para el control de malezas, principalmente latifoliadas y de algunas gramíneas (Costa et al., 2004) en dosis informadas en la provincia de Córdoba de aproximadamente 2 kg/ha o 2,5-3 L/ha en presiembra. Atrazina se considera un contaminante ambiental debido a su lenta biodegradación. Este compuesto es moderadamente soluble en agua (30 mg / L a 20 ° C), presenta baja volatilidad (Presión de vapor y constante de la Ley de Henry son bajos), posee una alta vida media (elevada persistencia) en el suelo y mediana capacidad de adsorción (Koc), por lo cual su potencial de lixiviación es considerado alto (Nödler et al. 2013). Con respecto a su persistencia, existen diversos estudios, por ejemplo, en campos agrícolas de Georgia, California y Minnesota (EUA), en los que se obtuvieron valores de vida media ($t_{1/2}$) de atrazina de 13, 58 y 261 días, respectivamente. Las diferencias reportadas se atribuyen a la variación de temperatura entre los estudios, concluyendo que la atrazina es más persistente en clima frío, dada la menor actividad microbiana en esos climas (USEPA 2006). En Argentina, los valores reportados por Delmonte et al. (1997) determinaron que la persistencia en un suelo de Balcarce y San Cayetano fue de 143 y 221 días respectivamente. En suelos de Córdoba, los $t_{1/2}$ fueron de 16 y 41 días para suelos con y sin historia de aplicación de atrazina, respectivamente y de 31 y 40 días para suelos con cultivo y con cobertura natural respectivamente (Hang et al., 2003; 2007).

La movilidad de los plaguicidas en el suelo y por tanto, su biodisponibilidad y transferencia a la atmósfera o el agua, superficial o subterránea, depende de los mecanismos y la cinética de su absorción y desorción de las partículas del suelo (Moorman et al., 2001). La lixiviación de plaguicidas en el subsuelo ocurre a través del flujo en la matriz del suelo y a través de vías preferenciales que permiten la entrada rápida de solutos no degradados. Se ha reconocido la existencia de flujo preferencial a través de macroporos y heterogeneidades del suelo y la zona no saturada (ZNS) y se ha estudiado a diferentes escalas (Beven y Germann, 2013; Jarvis et al., 2016) Dufilho y Falco, 2020). Debido al costo y la dificultad de realizar estudios de campo a largo plazo para cuantificar y monitorear contaminantes son cada vez más adoptadas las simulaciones de modelos por computadora para comprender los procesos y para realizar pronósticos de utilidad para el manejo.

El objetivo del presente estudio es analizar la distribución espacial de atrazina en el agua subterránea en un sector de la llanura fluvio-eólica de la provincia de Córdoba bajo actividad agrícola predominante, analizando los factores hidrogeológicos relacionados. Se realiza además, una modelación numérica del transporte de atrazina en la zona no saturada para discernir los procesos principales que contribuyen a su llegada al acuífero libre.

METODOLOGIA

Se realizó la recopilación, análisis e interpretación de los antecedentes climáticos, hidrológicos, litológicos, estratigráficos, geomorfológicos y cartográficos disponibles. Se utilizaron hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50,000 y de imágenes satelitales (Google Earth, LANDSAT ETM+). El estudio geológico-geomorfológico se llevó a cabo a través de la descripción e interpretación del relieve y perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones.

En la toma de muestras de agua subterránea, en cada perforación, se garantizó la renovación del agua de la captación, controlando además la temperatura del agua hasta su estabilización. Se midieron in situ pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (OD), con sonda multiparamétrica Hanna (HI 98127). Para analizar la presencia de atrazina en el acuífero libre se tomaron 33 muestras de los primeros 10-15 m del acuífero libre, correspondientes al periodo de muestreo Septiembre-Noviembre 2016, coincidente con la estación de primavera e inicio del periodo húmedo.

Los análisis físico-químicos de las muestras, siguiendo Standard Methods (APHA, 2005), fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (UNRC). La determinación de atrazina se realizó en el departamento de Microbiología de la Universidad Nacional de Río Cuarto mediante inmunoanálisis enzimáticos competitivo (ELISA) de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Para este fin se utilizó el kit comercial Abraxis Atrazine ELISA (Abraxis, Inc, Warminster, PA). La intensidad del color se determinó leyendo la densidad óptica a 450 nm usando un lector de placas Labsystems Multiskan MS. El límite de detección establecido por el fabricante del kit de prueba es de 0,04 μg / L de atrazina (García et al, 2019).

Para la realización del modelo de transporte de atrazina, se utilizó el programa MACRO 5,0 (Larsbo y Jarvis, 2003), que incorpora doble permeabilidad de flujo de agua y transporte de solutos reactivos en el perfil de suelo, La porosidad del suelo la divide en dos dominios, microporos y macroporos. El intercambio de agua y soluto se calcula utilizando expresiones aproximadas de primer orden basadas en una longitud de trayectoria de difusión efectiva. El flujo de agua vertical a través de los microporos en la zona no saturada se calcula usando la ecuación de Richards y se usa una forma modificada de la función de van Genuchten para describir la función de retención de agua. A través de los macroporos, el flujo vertical se calcula mediante la ecuación de Darcy asumiendo un gradiente hidráulico unitario. El transporte de solutos en los microporos se calcula mediante la ecuación de advección-dispersión, mientras que en los macroporos es solo transporte advectivo. Para describir la sorción de plaguicidas se utiliza una isoterma de Freundlich y se supone una cinética de primer orden para la degradación. El balance hídrico incluye precipitación, evapotranspiración, filtraciones profundas. El balance de solutos incluye transporte advectivo-dispersivo, sorción, biodegradación, absorción de plantas e intercepción del dosel (Dufilho y Falco, 2020). De la página SIS INTA se utilizó la descripción de un suelo de la zona, cercano al sitio muestreado (INTA 28-2023C-La Resistencia) y típico de la zona analizada, siendo un suelo de tipo Endoacuol típico, con textura limosa fina a limosa gruesa. Se simplificó el horizonte A, que quedó definido por la suma de horizontes Ank y Acnk.

DESCRPICION DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona se ubica al sur del río Ctalamochita (río Tercero), desde la vertiente oriental de la sierra de Las Peñas (terminación austral de las sierras Chicas de Córdoba,)

y Los Cóndores, hacia la llanura fluvioeólica adyacente, dentro de la llanura Chacopampeana, en un área de aproximadamente 350,000 ha. La actividad predominante es agrícola, con dominio de soja, maíz, trigo y en menor medida, maní y alfalfa, con prácticas de manejo de rotación de cultivos y siembra directa e intensivo uso de agroquímicos. La actividad ganadera extensiva está subordinada (bovina y ovina), siendo más común los feedlots de bovinos y porcinos y los tambos. El área urbana solo ocupa un 0,04 % del área total estudiada (Fig, 1).

El clima es subhúmedo-seco, con pequeños excesos de agua y precipitación media anual de 761 mm promedio para el área que se distribuye el 80% en la época de primavera verano, de Septiembre a Marzo y el 20% restante en los meses de otoño invierno.

La zona posee una gran heterogeneidad hidrogeológica derivada de su cercanía a las sierras adyacentes, que generaron en diversos periodos geológicos, la sedimentación de materiales fluviales y aluviales gruesos intercalados con materiales finos, limosos, de origen eólico que obliteran las geoformas anteriores.

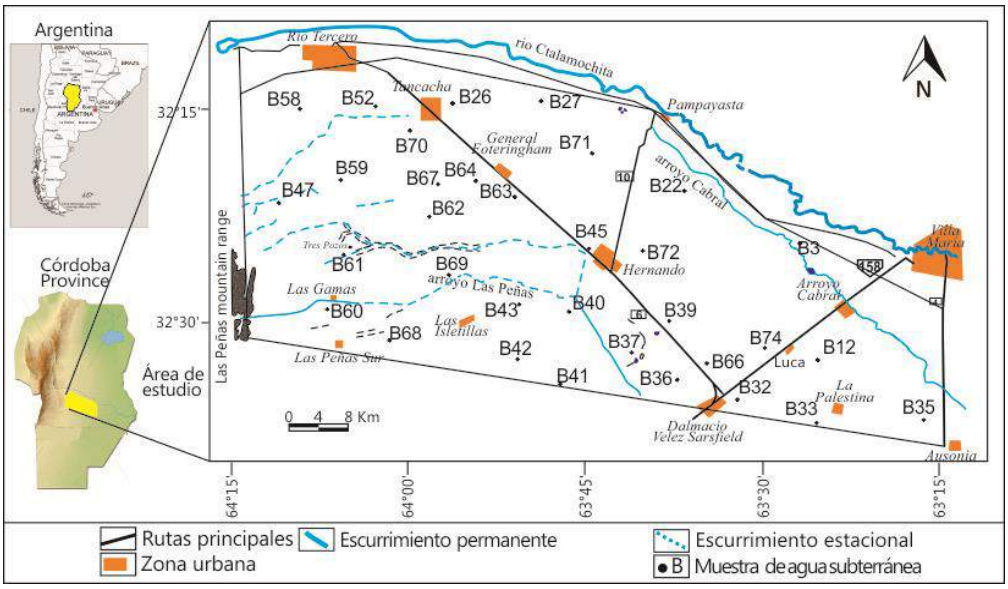


Figura 1: Ubicación del área de estudio

RESULTADOS Y DISCUSION

Hidrogeología

A partir de las características hidrogeológicas el área fue dividida en 4 unidades hidrogeológicas principales (UH) (Fig, 2). El acuífero presenta sedimentos de muy variable textura, más finos en el sector de UH1, pedemonte de Sa, De los Cóndores y más gruesos en UH2, el pedemonte de Sa, De Las Peñas. La UH3 se caracteriza por el dominio de sedimentos de textura areno gravosa de génesis fluvial, mientras UH4 por sedimentos arenosos muy finos de origen eólico. La profundidad del nivel freático es variable, fundamentalmente relacionada con las características topográficas. Así, los valores más altos se encuentran en el área NO (> 58 m) y los más bajos (0–3 m) en las áreas topográficas bajas del sur. El sentido general de flujo del acuífero libre es de Oeste a E-SE, coincidente con el sentido de escurrimiento superficial. En la zona pedemontana se encuentra la zona de recarga preferencial y presenta además sitios donde el agua de

los cursos que proceden de las sierras se infiltran, por lo que el acuífero tiene carácter efluente. Hacia el Este, se observa una relación de influencia, donde el acuífero libre aporta agua a los arroyos definiendo su régimen permanente. La morfología de la superficie freática es de moderada a suavemente ondulada a plana, hacia el Este. Los gradientes hidráulicos son variables, en la zona pedemontana, poseen valores de 1,5 % y al Este, alrededor del 0,1 %.

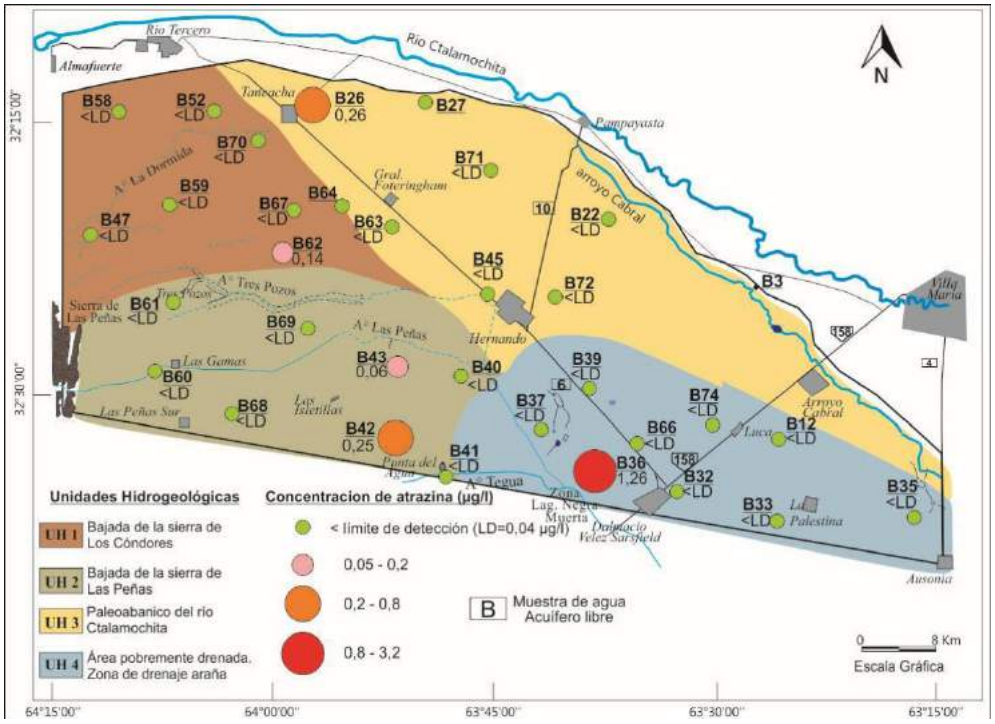


Figura 2: Unidades hidrogeológicas y distribución espacial de atrazina en agua subterránea

ATRAZINA EN EL AGUA SUBTERRANEA

Atrazina fue detectada en 5 muestras (14,7 % del total), en concentraciones de 0,14 a 1,26 µg/L. En el mapa de la figura 2 se observa que las muestras con atrazina se distribuyen en todas las UH. En la UH 1 se encuentran las muestras B42 y B43, con 0,25 y 0,06 µg/L de atrazina, respectivamente. En B42 el nivel freático se ubica a 4,4 m de profundidad, sitio en el que la aplicación de atrazina se había producido en días previos a la toma de la muestra. En B43 la concentración es menor, aunque la profundidad del nivel es sólo de 1,8 metros, sin dato disponible de la última aplicación. En la UH2, la muestra B62 presenta una concentración de 0,14 µg/L y la profundidad del nivel freático es de aproximadamente 20 metros. En la UH3 se ubica B26, con una concentración de atrazina de 0,26 µg/L, aquí el nivel freático se encuentra relativamente profundo (25 m). En la UH 4 se encuentra la muestra de agua subterránea con mayor concentración de todas las medidas, B36, con 1,26 µg/L de atrazina, sitio en el que el nivel freático se midió a 3 metros de profundidad, evidencia mayor vulnerabilidad del acuífero a ser impactado.

Uno de los factores que puedan favorecer la llegada de atrazina al acuífero libre, es la profundidad del nivel freático, del total de las muestras con resultado positivo, 3 se

ubican en sitios donde la ZNS está conformada por sedimentos de arena muy fina/limo y donde el nivel freático se encuentra a menos de 4,5 m de profundidad, situación que propicia la llegada de contaminantes al mismo por la cercanía a la superficie. El otro factor relevante está determinado por la litología de la ZNS, así en sitios donde el nivel freático se encuentra relativamente profundo (>20m), se encuentra atrazina, que puede haber migrado por flujo preferencial o bien por la alta conductividad hidráulica (K) de los sedimentos de la zona no saturada, ya que existe mayor velocidad de flujo de agua, por lo que el herbicida posee menor contacto con la matriz del suelo, aumentando su potencial de lixiviación o transporte vertical. Esto fue determinado también por Montoya et al., (2006), quienes indican que son más importantes las propiedades intrínsecas del suelo que el sistema de labranza, al comparar la lixiviación de atrazina en labranza convencional y siembra directa.

MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE SOLUTOS EN ZONA NO SATURADA

El sitio seleccionado para la modelación numérica con MACRO 5,0 se ubica en la UH4, donde predominan en superficie depósitos eólicos loéssicos, en el sitio donde se obtuvo la muestra de agua del acuífero libre B36, que presentó la mayor concentración de atrazina. Los resultados de campo y de laboratorio sumado a la información bibliográfica, permitieron parametrizar el sitio a modelar (Fig, 3). La calibración se realizó con datos de profundidad de nivel freático y con datos de concentración de atrazina medidos en el agua subterránea (en dos muestreos de los años 2016 y 2017), mientras que la validación se efectuó con glifosato determinado en el suelo del sitio modelado para el año 2017, ocasión en la que glifosato fue degradado y no llegó al acuífero. Las propiedades del suelo correspondiente al sitio seleccionado se observan en la tabla I.

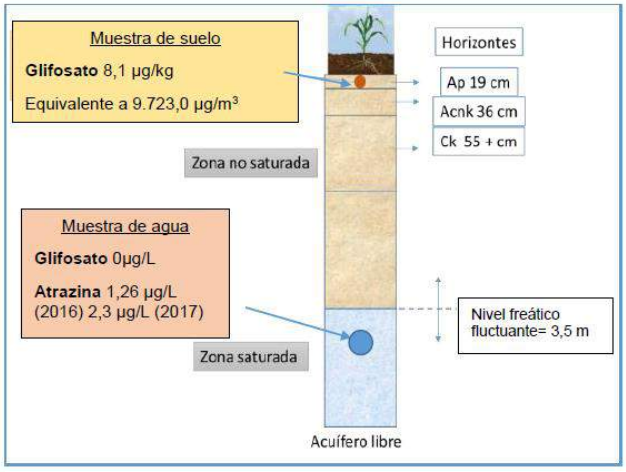


Figura 3: Esquema del sitio modelado y algunos de los parámetros usados

La aplicación de MACRO 5,0 se realizó utilizando al nivel freático como límite inferior para el perfil, por lo tanto, se consideró que el suelo tenía una profundidad de 3,6 m, Para la resolución numérica de la ecuación de transporte, el perfil del suelo se dividió en 100 capas y los parámetros del modelo se estimaron mediante el método de prueba y error utilizando mediciones de campo, laboratorio y valores bibliográficos. La calibración fue realizada con un dato de concentración de atrazina en el agua subterránea en un muestreo posterior al que se presenta en este trabajo, correspondiente a Octubre del año 2017 cuyo valor fue de 2,3 µg/L.

Tabla I
Propiedades del suelo

Horizonte	Prof,(cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura	OC (%)
Ap	0 - 19	19,4	59,7	21,8	Silt loam	1,0
Ank	19 - 30	19,2	56,9	25,3	Silt loam	0,2
Acnk	30 - 55	19	56,7	24,3	Silt loam	0,1
C	55 +	17,5	56,4	25,9	Silt loam	x

Se le aplicó también al modelo la información respecto a las concentraciones de atrazina en el suelo y el agua de lluvia como situación inicial previa a la incorporación del herbicida pulverizado, siendo los valores obtenidos de muestreos en suelo y agua de lluvia del año 2018 (9,000 μg/m3 y 0,73 μg/L respectivamente). El Koc incorporado fue determinado en laboratorio para el suelo modelado, con un valor de 140 L/kg. La Tabla II muestra los parámetros hidráulicos calibrados y la Tabla III indica los parámetros de transporte calibrados correspondientes a las características físico/químicas del herbicida modelado (atrazina) y los parámetros relacionados al cultivo (maíz).

Tabla II: Parámetros hidráulicos calibrados de MACRO

Horiz.	ALPHA	ASCALE	CTEN	KSATMIN	KSM	TPORV,	WILT	XMPOR,	ZM	ZN
Ap	0,02	15	10	77,9	7,5	53,07	12,6	48,6	0,5	4,0
Ank	0,02	10	10	78,0	8,5	46,19	12,3	41,7	0,5	4,0
Acnk	0,1	10	10	78,0	8,0	46,19	12,3	41,7	0,5	4,0
C	0,1	10	10	79,0	9,6	39,11	12,0	34,8	0,5	4,0

ALPHA alpha of van Genuchten function (1 cm−1), ASCALE Effective diffusion pathlength (mm), CTEN Boundary soil water tensión (cm), KSATMIN Saturated hydraulic Conductivity (mm · h−1) KSM Boundary hydraulic conductivity (mm · h−1) TPORV, Saturated water content %, WILT Wilting point,%, XMPOR, Boundary soil water content, %, ZM Tortuosity factor micropores, ZN Pore size distribution factor for macropores,

Tabla III: Parámetros calibrados del transporte de soluto y cultivo

	Descripción	Unidad	Horiz.	Atrazina
DEGMAL – DEGMIL	Degradation rates macropores and micropores liquid phase	d-1	Ap	0,003
			Ank	0,003
			Acnk	0,0003
			C	0,0003
DEGMAS – DEGMIS	Degradation rates macropores and micropores solid phase	d-1	Ap	0,003
			Ank	0,003
			Acnk	0,0003
			C	0,0003
ZKD	Sorption coefficient	mL · g−1	Ap	1,3
			Ank	0,14
			Acnk	0,14
			C	0,01
CROP	IDSTART,302, ZDATEMIN 332/ IDMAX 360 / IHARV 70 / HARVYEAR 2018 / FORM 1,7 DFORM 0,3/ RPIN 30/ FAWC 0,75/ CRITAIR 5/ BETA 0,2/ CANCAP 2 ZALP 1			

Se incorporaron también datos de precipitación diaria y evapotranspiración, de los años 2015, 2016 y 2017. Se modelaron los años 2016 y 2017 ya que son los años con muestras de agua y suelos, utilizados para fines de calibraciones y validaciones. En

el parámetro de riego se incluyó el valor de concentración de cada herbicida aplicado por pulverización, teniendo en cuenta la cantidad de agua utilizada por hectárea y la cantidad de herbicida. Se obtuvo el grafico correspondiente a la profundidad del nivel freático simulado (Fig, 4) donde se observa que los aumentos y descensos presentan, según el modelo, variaciones máximas de 100 cm en los años modelados (similar a los valores medidos con el transductor para el periodo posterior 2018-2019). Se puede establecer además una buena correlación entre los niveles simulados y los medidos en campo.

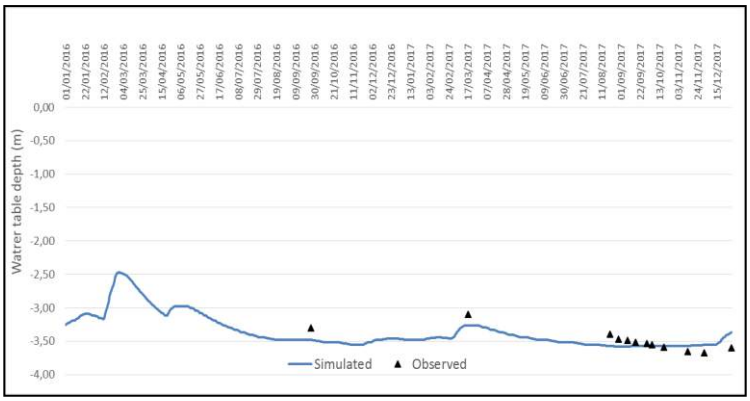


Figura 4: Comparación de la profundidad del nivel freático modelado y medido.

Se realizó el gráfico que exhibe la concentración de atrazina en todo el perfil analizado (parámetros ADMA y ADMI en MACRO), en la fase sólida y para el periodo 2015 a 2017 (Fig, 5). Este gráfico muestra que las concentraciones comienzan a aumentar en los meses donde empiezan las aplicaciones modeladas (invierno de 2015) y exhibe picos donde se concentran las aplicaciones de primavera verano. Luego disminuye desde la última aplicación del año hasta el año subsiguiente donde se observa otra vez el incremento desde el invierno de 2016, momento donde comienza la aplicación de tal año, para luego verse incrementada continuamente durante 2017. El gráfico exhibe un aumento continuo en la concentración de este herbicida en la fase sólida mientras existan momentos de aplicación de atrazina. Además, los valores indicados modelados corresponden a concentraciones notablemente mayores que las que se hallan en aguas subterráneas, indicando que es el sistema suelo quien se encuentra principalmente afectado. Se asume que si esto ocurre, el suelo comienza a perder su poder de filtración, amortiguación, depuración y regulación de los ciclos biogeoquímicos, tal como lo define Comerford (2003), potenciando a futuro, la lixiviación de atrazina al acuífero libre. Este hecho también lo hallan destacable diversos autores como Costa et al. (2011) y Aparicio et al. (2015).

Con respecto a la lixiviación del herbicida hacia el acuífero libre, se realizó un gráfico con el valor de la tasa de lixiviación de soluto total en la base del perfil del suelo analizado, que es justamente el nivel freático, ubicado en ese momento a 365,0 cm. La lixiviación incluye flujo tanto en micro como macroporos y sus unidades son µg/m2/h (Fig. 6). A partir de este gráfico el modelo muestra la llegada

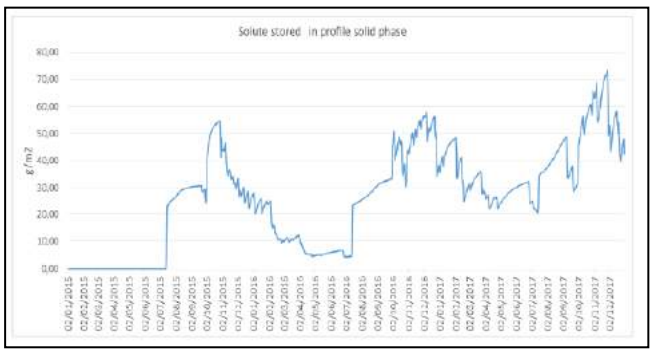


Figura 5: Concentración de atrazina en la fase solida de todo el perfil durante dos años modelados

de atrazina al acuífero libre en dos épocas, en marzo de 2016 y sobre todo y con mayor importancia desde marzo de 2017 y en notable incremento, que se asume disminuirá si la aplicación cesa.

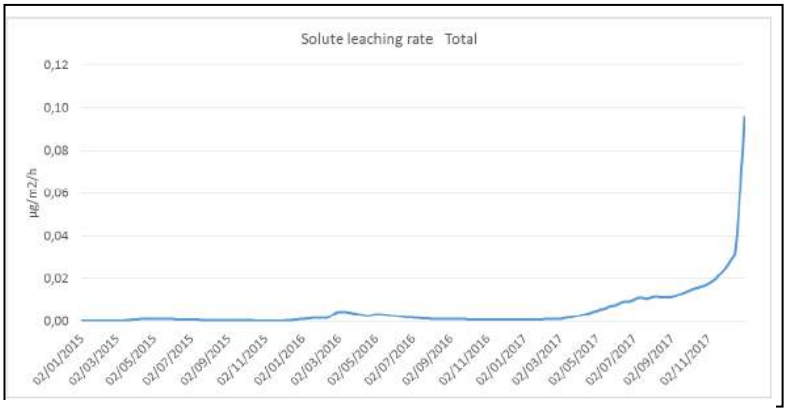


Figura 6: Tasa de lixiviación modelada de atrazina por la base del perfil del suelo

Se realizó el análisis de las concentraciones de atrazina en la fase liquida (micro y macroporos) de perfil hasta los 3,65 m, que como se indicara, es la profundidad del nivel freático para el momento modelado, octubre 31 de 2017 (medido a campo y con el transductor) (Fig, 7a). De este modo, el modelo se calibró para corroborar que además de los procesos descriptos, el día muestreado arrojara un valor de atrazina similar a la medida en el agua del acuífero que fue de 2,3 µg/L, equivalente a 2,300 µg/m3. Luego de ser ejecutado, el modelo arroja un valor de 2.231,15 µg/m3 para este sitio, para el día de muestreo, pudiendo destacarse la similitud entre el valor medido y el modelado. Es decir que el modelo se acerca notablemente a las condiciones de campo que propiciaron esta concentración en el agua del acuífero libre. Este gráfico permite inferir que la concentración de atrazina aumentará para la misma profundidad y a medida que se siga aplicando el herbicida en el tiempo.

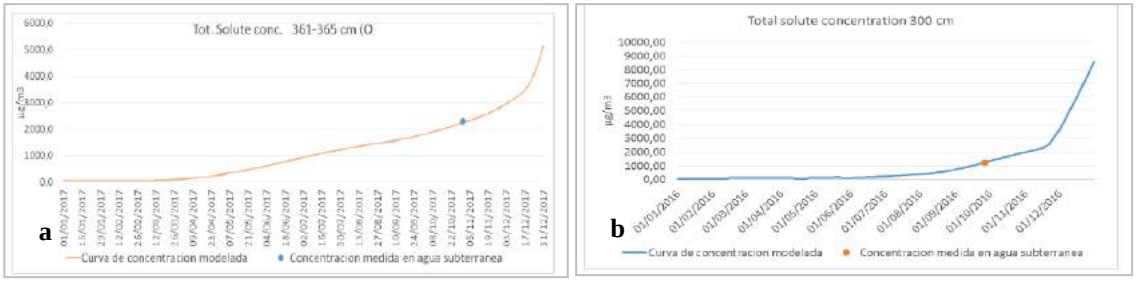


Figura 7: A: Curva de concentración modelada y medida (10/2017). **B)** Validación con medida en 09/2016.

Una primera validación del modelo se realizó al observar la concentración de atrazina en otra fecha diferente a la usada en la calibración. El muestreo del 26 de septiembre de 2016 resultó en una medida de laboratorio de 1,26 µg/L de atrazina (equivalente a 1.260 µg/m3). El modelo indica para esta fecha, para la profundidad a la que se encontraba el acuífero libre (3,0 m) una concentración de 1.258,25 µg/m^3 (Fig. 7b), por lo que se asume que este modelo está calibrado.

Teniendo en cuenta la profundidad a la que se realizó el muestreo de suelos, la tasa de flujo de soluto modelada en los primeros 10 a 19 cm del suelo por macroporos y microporos se observa en la figura 8 a y b. Estos gráficos exhiben que la atrazina presenta una tasa de flujo variado por micro y macroporos, pero es más común que

fluya por microporos y durante mucho más tiempo. Se observan altos valores en los meses de octubre y noviembre, disminuyendo en los meses de otoño/invierno. Por macroporos se observan episodios más aislados entre sí, con el mayor valor en octubre de 2016 y menores tasas en octubre y noviembre de cada año. Se destaca un valor de tasa relativamente alto en Julio de 2017, coincidente con dos meses invernales en los que la precipitación que es normalmente nula fue de 25 y 17 mm para cada mes respectivamente. Ambos gráficos exhiben que la tasa de flujo de soluto se ve fuertemente asociada a las precipitaciones. Tal asociación fue hallada también por estudios como los de Sanchez Camazano et al. (2005), quienes evaluaron espacial y temporalmente al herbicida atrazina en aguas superficiales (0,04–25,3 µg/L) y subterráneas (0,04–3,45 µg/L) y cuyas concentraciones también se vincularon a las épocas de lluvias.

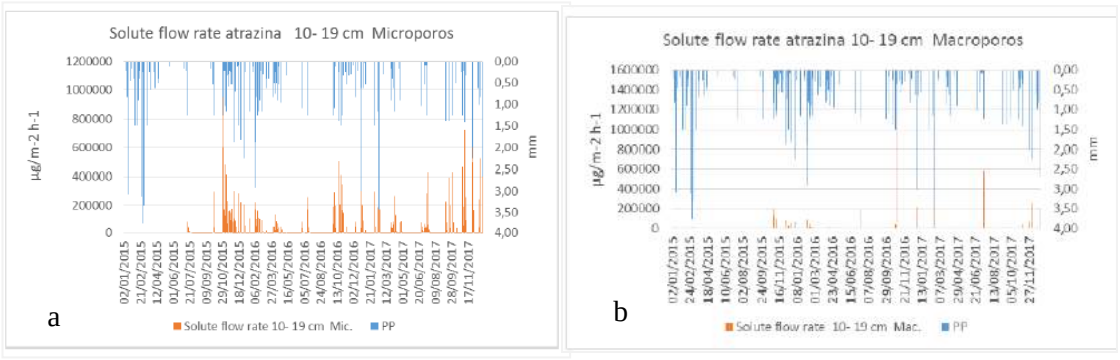


Figura 8. A) Tasa de flujo de atrazina modelada por microporos. B)Tasa de flujo de atrazina modelada por macroporos.

CONCLUSIONES

La distribución espacial de atrazina en el agua subterránea en diferentes sectores con características hidrogeológicas distintivas permitió definir que existen factores que propician la llegada de este contaminante al acuífero libre.

El primero es la profundidad del nivel freático: en sitios con pequeño espesor de ZNS, se asume una mayor llegada de contaminantes por la cercanía con la superficie. El segundo factor relevante está determinado por la litología de la ZNS: en zonas de materiales sedimentarios gruesos como arenas y gravas del paleoabanico aluvial de Ctalamochita, muy permeables, atrazina exhibe alta movilidad, debido posiblemente a su bajo Koc y mayor velocidad de flujo de agua por los poros, por lo que puede concebirse su llegada al acuífero libre, aunque el nivel freático está relativamente profundo.

La modelación numérica reveló que el transporte de agua y atrazina se produce tanto por microporos en forma continua como por macroporos en menor medida y en forma episódica (flujo preferencial por grietas, huecos de raíces, etc,). El flujo por macroporos está ligado a los periodos de más precipitaciones (septiembre a marzo) que además permiten el transporte de mayores tasas de solutos. El suelo es donde se encuentran las mayores concentraciones de herbicidas aunque el agua subterránea pasó a ser un subsistema ambiental en el que aparece actualmente el herbicida, por transferencia debida a transporte advectivo/dispersivo/reactivo. Si bien los valores son

bajos, demuestran el impacto al sistema natural. Por ello, el mismo debe ser monitoreado en el tiempo para conocer su evolución, su variación estacional e incluso interanual.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue subsidiado por foncyt - PICT 2015-0474 y Secyt UNRC

REFERENCIAS

Aparicio V., E. De Gerónimo, K. Hernández Guijarro, D. Pérez, R. Portocarrero y C. Vidal. Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente. *Ed.INTA. ISBN 978-987-521-665-5.*(2015)

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *21st Edition, A. Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Fed., Washington DC.* (2005).

Arias-Estévez M, E López-Periago, E Martıínez-Carballo, Jesús Simal-Gándara, J C Mejuto, Luis García-Río. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123: 247–260. (2008).

Beven, K., Germann, P. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resour. Res.*, 49, 3071–3092. (2013).

Comerford N. Soil: Largest reactor on the planet? *https://soilsmatter.wordpress.com/2013/12/02/soil-largest-reactoron-the-planet/*. (2003).

Costa J. L., Aparicio V., Zelaya M. Gianelli V. y F. Bedmar. Transporte de imazapir, atrazina, s-metolacloro y acetoclor en el perfil un suelo argiudol del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Estudios de la zona no saturada del suelo 157*-162. (2011).

Delmonte, A.A.; Bedmar, F.; Mantecon, J.D.;Echeverria, H.; Barassi, C.A. Residual phytotoxicity and chemical persistence of atrazine in soils of the southeast of Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of Environmental Biology*, v.18, n.3, p.201-207.(1997).

Dufilho A.C., Falco S**.** Preferential flow modelling of chlorpyrifos leaching in two arid soils of irrigated agricultural production areas in Argentine Patagonia. *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 229, 2020, 103584, ISSN 0169-7722. (2020).

FAO. Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *FAOSTAT. Disponible en http://www.fao.org/statistics/es/. (*2019)

García M, Lutri V.F, Blarasín M., Matteoda E., Bettera S. Monitoring of atrazine in surface waters of an agroecosystem in the province of Córdoba (Argentina) using an immunoassay technique. *International Journal for Research in Agricultural and Food Science* Vol. 5-4. (2019).

Hang, S., Barriuso, E., Houot, S. Behavior of 14C-Atrazine in Argentinean topsoils under different cropping managements. *Journal of Environmental Quality*, 32, 2216-2222. (2003).

Hang, S., Houot, S., Barriuso, E. Vertical variation of atrazine mineralization capacity in soils. *Agriscientia* 24, 2, 87-95. (2007).

Jarvis, N., Koestel, J., Larsbo, M. Understanding preferential flow in the vadose zone: recent advances and future prospects. *Vadose Zone J.* 15 (12). (2016).

Larsbo, M., Jarvis, N. Macro 5.0. A Model of Water Flow and Solute Transport inMacroporous Soil. *Technical Description. Swedish University of Agricultural Sciences* 48 p**.** (2003).

Lutri V, Matteoda E., Blarasin M., Bachetti R. y C. Morgante. Identificación preliminar de atrazina en el acuífero libre y agua superficial en la llanura fluvio eolica del centro de Córdoba. Taller: Plaguicidas en el ambiente. INTA Balcarse. Poster. (2016).

Lutri, V., Matteoda E., Blarasin M, García M, Cabrera A., Giuliano Albo J.,Becher Quinodoz F., Maldonado L. y Giacobone D.. Evaluación de atrazina en el agua subterránea en zona Proximal del abanico aluvial del rio Tercero". V Jornadas Interdisciplinarias "Ciclo del

agua en agroecosistemas". V Jornadas Interdisciplinarias "Ciclo del agua en agroecosistemas". UBA. BsAs. Argentina. InVet 20(2):30. (2018)
Montoya J., Costa J., Liedi R., Bedmar F. y Daniel P. Effects of soil and tillage practice on atrazine transport through intact soil cores. *Geoderma* 137, 161-173. (2006).
Moorman T.B., Cowan J.K., Arthur E.L., Coats J.R. Organic amendments to enhance herbicide biodegradation in contaminated soils. *Biol. Fertil. Soils* 33:541-545. (2001).
Nödler K., Licha T. y Voutsa D. Twenty years later – atrazine concentrations in selected coastal waters of the Mediterranean and the Baltic Sea. *Mar. Pollut. Bull*. 70, 112-118. (2013).
PNUMA. (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente). A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment. Nairobi, *PNUMA.* en.unesco.org/emergingpollutants. (2016).
Pretty J y Bharucha Z P. Integrated Pest Management for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa *Insects*. 6(1), 152-182; doi:10.3390/insects6010152. (2015).
Sanchez Camazano, M., Lorenzo L. y M. Sánchez-Martín. Atrazine and alachlor inputs to surface and ground waters in irrigated corn cultivation areas of Castilla-Leon region, Spain. *Environ Monit Assessm*. 105(1-3): 11-24. (2005).
SIS – INTA. Sistema de información de Suelos del INTA. *Base de dato online.* *http://sisinta.inta.gob.ar/*.
USEPA. Decision documents for atrazine. *USEPA, Washington, DC.* *https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-080803_1-Apr-06.pdf. (*2006).

ANÁLISIS DE AMENAZAS Y PERCEPCIÓN DEL RIESGO EN LOS ALREDEDORES DEL PASO INTERNACIONAL DE FUTALEUFÚ

Maino Minetto M.[a], Colavitto B.[a,b] y Winocur D.[a,b]

[a]*Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*
[b] *Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN)*

e-mail: matiasmainom@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo forma parte de la evaluación del riesgo geológico en los alrededores de la localidad de Futaleufú, ubicada en los Andes Norpatagónicos chilenos (43°10'S, 71°52'O). Se llevó a cabo un relevamiento de campo en la zona, en colaboración con la municipalidad de Futaleufú y el SERNAGEOMIN, y trabajos de gabinete con imágenes satelitales, con la finalidad de obtener un mapa de riesgo geológico del área de estudio. Una encuesta realizada a un sector de la población de Futaleufú, demostró que los principales peligros a los cuáles los locales se consideran expuestos son los procesos de remoción en masa. En consonancia con esto, se registraron algunos eventos de mayor relevancia como flujos de detritos, caídas de rocas y un escenario de potencial aluvión, producto de la ruptura y desagote de lagos endicados por morrenas. En el primer caso, se levantaron perfiles sedimentarios en un depósito de bloques de gran tamaño, en la quebrada del arroyo Anderson, correspondiente a un flujo de detritos ocurrido en el año 2004. Por otra parte, se estudió la ladera ubicada al norte de Futaleufú para caracterizar la amenaza por caída de rocas. Se midió su pendiente y la ubicación y dimensión de los distintos bloques observados, para así estimar el alcance máximo de futuros desprendimientos. Por último, se analizaron tres lagunas ubicadas en las nacientes del arroyo Don Claudio al norte de Futaleufú. Se midió su batimetría y se caracterizó la composición y estabilidad de las morrenas y de las paredes que las rodean. Esta información sirve para estudiar las causas y consecuencias de un posible aluvión. La información obtenida hasta el momento indica que los flujos de detritos son los eventos más recurrentes de la zona; sin embargo, es preciso continuar estudiando las lagunas mencionadas dado el potencial peligro que suponen para Futaleufú.

Palabras Clave: Riesgo Geológico, Remoción en masa, GLOF, Patagonia.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo identificar y caracterizar las principales amenazas geológicas, asociadas principalmente a los movimientos de remoción en masa, en las zonas aledañas a la localidad de Futaleufú, en los Andes Norpatagónicos chilenos (ver Fig. 1). Esta zona tiene una gran importancia socio-económica, debido a que se encuentra próxima a uno de los pasos fronterizos entre Argentina y Chile. El análisis del riesgo geológico realizado contempla no sólo las principales amenazas geológicas sino las condiciones sociales, físicas y económicas de las poblaciones expuestas. En la zona

existen antecedentes recientes de eventos de remoción en masa, como el de la villa Santa Lucía en 2017, que produjo muertes y destrucción de numerosas viviendas (Duhart et al., 2019). Así es que estudiar las características geológicas, climáticas, geomorfológicas y sociales de esta zona se vuelve de vital importancia.

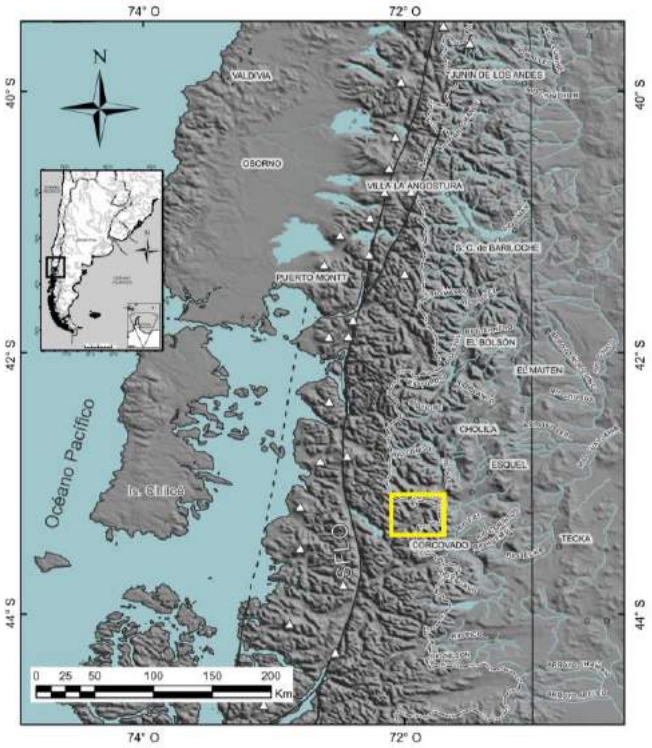


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio dentro del contexto de los Andes Norpatagónicos. Se señalan las principales localidades, volcanes activos y el sistema de fallas Liquiñe-Ofqui (SFLO).

La geología del área de estudio está dominada por afloramientos de rocas volcánicas jurásicas (Grupos Divisadero) e intrusivos graníticos-andesíticos cretácico-miocenos (Batolito Patagónico Cordillerano). Estas unidades se encuentran fuertemente deformadas como resultado de distintos pulsos de construcción de los Andes durante el Mesozoico y Cenozoico, producto de la convergencia de la placa de Nazca con la Sudamericana (Zapata y Folguera, 2005; Folguera et al., 2007). Esta convergencia es en parte responsable de las elevadas tasas de sismicidad en la región, donde se registró uno de los sismos históricos más importantes de la historia instrumental (Terremoto de Valdivia 1960; Moreno et al., 2009). Además la componente de rumbo de la convergencia favorece el desarrollo de una estructura transcurrente dextral de carácter regional que se extiende aproximadamente 1200 km, con orientación NNE, denominada sistema de fallas de Liquiñe-Ofqui (ver Fig. 1) (Cembrano et al., 1996; Arancibia et al., 1999; Pérez-Flores et al., 2016). Es sabido que los movimientos sísmicos son uno de los disparadores más comunes de distintos eventos de remoción en masa (Keefer, 1984). En su análisis, Keefer (1984) determinó que sismos de Mw > 4 son capaces de disparar caídas de rocas y sismos de Mw > 5 pueden gatillar flujos o deslizamientos. Además, relaciona distancia con magnitud del sismo, encontrando que sismos de Mw > 4 producen eventos de remoción en masa locales (~0 km al epicentro) y sismos de Mw ~9 pueden gatillar remoción en

masa hasta 500 km de la zona del epicentro (Keefer, 1984). Esto es lo que se observa en la zona de estudio donde tanto los sismos asociados a la trinchera como al sistema de fallas de Liquiñe-Ofqui se asocian al desarrollo de deslizamientos submarinos, avalanchas de roca y otros procesos de remoción en masa de menor envergadura (Chaprón et al., 2006; Sepúlveda, 2010; Oppikoffer et al., 2012; Beigt et al., 2016).

En cuanto al clima, la localidad de Futaleufú se encuentra dentro de una zona húmeda, con precipitaciones anuales que superan los 2000 mm, siendo Mayo, Junio y Julio los meses con la mayor cantidad de lluvias que además se dan en conjunto con las nevadas, las cuales se extienden hasta el mes de Agosto (fuente: Weatherspark, datos MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis de NASA). Las lluvias tampoco son despreciables en los meses de verano, durante los cuales además se combinan con temperaturas más elevadas provocando el deshielo en las cumbres de las montañas. Las características climáticas del lugar revisten particular importancia, ya que están relacionados con los eventos de remoción en masa. Wieczorek y Glade (2005) resumen las variables climáticas que pueden actuar como disparadores de estos eventos, distinguiendo entre disparadores primarios y secundarios: los primeros desencadenan directamente los eventos y se los adjudica principalmente a intensas lluvias y a deshielos; mientras que los secundarios hacen referencia a eventos climáticos anteriores que luego, ya sea por actividad sísmica o volcánica, terminan en movimientos de este tipo.

La geomorfología de la zona está principalmente modelada por la acción fluvial de dos grandes cursos: los ríos Futaleufú y Espolón. Otro de los agentes modeladores del paisaje es la acción glaciaria, la cual responde a dos períodos principalmente, el Último Máximo Glaciario y al período Neoglacial o Little Ice Age (LIA) (Rabassa et al., 1980; Rabassa, 2008; Masiokas et al., 2009). Mccoll (2012) estudia que las glaciaciones y retrocesos glaciarios están directamente relacionadas con la desestabilización de las laderas, y dan como resultado eventos de remoción en masa. No sólo los glaciares ensanchan y profundizan los valles, generando mayor pendiente de las laderas sino que, al retirarse, generan liberación de presión de las laderas facilitando la unión de planos de debilidad previos de las rocas. A esto se le agrega que la actividad glaciaria aumenta la disponibilidad de material para ser movilizado.

En función del objetivo propuesto y teniendo en cuenta las características del área, se estudiaron algunos antecedentes relevantes de procesos de remoción en masa en el área de estudio. Para esto se realizó un relevamiento en campo que fue complementado con análisis de imágenes satelitales y un estudio de las características geológicas y climáticas de la región. En cuanto al estudio de la vulnerabilidad, aún no se confeccionó un análisis pormenorizado de la vulnerabilidad física de la localidad de Futaleufú, pero una encuesta breve a la población local fue realizada a los fines de estudiar la percepción del riesgo por parte de la población y las capacidades de respuesta de la misma.

MÉTODOS

Encuesta a la población local

Con la finalidad de estudiar la vulnerabilidad social, para el posterior análisis del riesgo, se llevó a cabo una encuesta a 60 pobladores de Futaleufú. Para obtener un resultado

representativo de la sociedad local, la encuesta se llevó a cabo en distintas locaciones (negocios, casas particulares, etc.) así como en la vía pública y abarcando un amplio espectro etario y de género. La encuesta se centró en conocer la percepción de la población hacia los peligros naturales a los cuáles se encuentran expuestos, saber cuáles fueron y/o son los que más los afectan teniendo en cuenta su experiencia personal y saber cómo actuarían si se encuentran ante una amenaza dada. Para ello se tomaron en cuenta los siguientes procesos naturales, recurrentes en esta región: Inundaciones, volcanes, incendios, derrumbes, tsunamis, tormentas, aluviones, terremotos, hantavirus, sequías y avalanchas de nieve.

Análisis de amenaza

La metodología de trabajo empleada para el análisis de amenazas consistió en la búsqueda de antecedentes de la zona de procesos de remoción en masa. Luego de estudiar mediante imágenes satelitales se eligieron distintas zonas (arroyo Anderson, casco de Futaleufú, arroyo Claudio) donde se realizaron los relevamientos de campo que consistieron en el reconocimiento de geoformas, litologías y levantamiento de perfiles sedimentarios. Para el caso de las caídas de rocas se analizaron los modelos digitales de elevación y relevó la ladera al norte de Futaleufú en busca de evidencias de desprendimientos anteriores. Por otra parte, para el estudio de los disparadores se tomaron en cuenta datos climáticos, como cantidad de precipitaciones mensuales, anuales y temperaturas anuales promedio de los últimos 37 años tomados de Weatherspark (datos MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis de NASA) y los registros sísmicos de la zona, estos últimos tomados de los catálogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Encuesta

A partir de las preguntas realizadas a la población de la muestra, se puede deducir que entre los pobladores de Futaleufú existe un relativo conocimiento sobre algunos de los procesos naturales a los cuales están expuestos. Las respuestas más reiteradas al consultar acerca de los procesos que podrían afectar a la zona de Futaleufú fueron el volcanismo y los aluviones (ver Fig. 2), lo que tiene directa relación con los grandes eventos que ocurrieron cerca tanto temporal como geográficamente: el aluvión de Villa Santa Lucía (2017) y la erupción del volcán Chaitén (2008). Además de estos dos procesos, el tercer proceso más mencionado, fueron los incendios sin control. Éstos no sólo tienen un impacto directo sobre el ganado e infraestructura urbana, sino que también lo tiene sobre la vegetación, lo cual indirectamente contribuye a los movimientos de remoción en masa. De hecho, de forma secundaria los derrumbes también fueron mencionados, siendo que afectan la vida cotidiana al producir cortes de rutas y caminos.

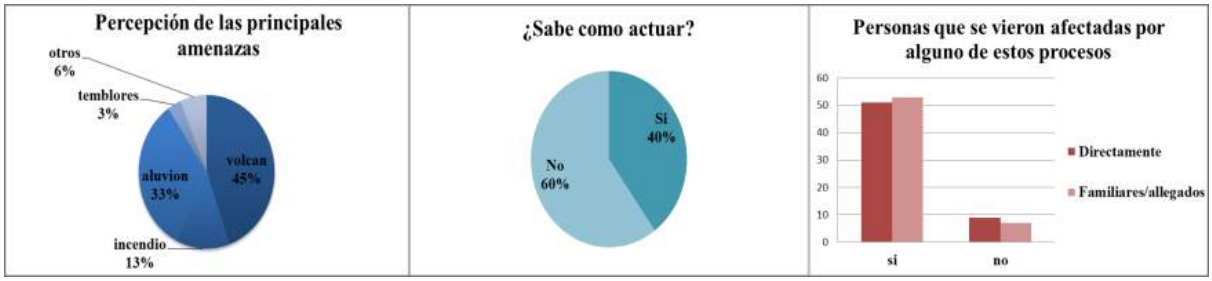


Figura 2. Resultados de las encuestas realizadas a la población de Futaleufú**.** Tipos de procesos que se perciben como amenazas principales. **b.** Porcentaje de los encuestados que sabrían cómo actuar ante un proceso dado. **c.** Afectación, directa o indirecta, a alguno de los procesos seleccionados.

Se desprende de lo anterior que el total de las personas encuestadas se vieron afectadas directamente (o tienen un vínculo estrecho afectado directamente) por alguno de estos procesos naturales. Pese a ello, los resultados indican que el 60% de los encuestados no sabe cómo actuar ante alguna potencial amenaza y, del grupo de quienes sí sabrían cómo actuar, todos manifestaron saberlo solo para algún tipo particular de proceso (ver Fig. 2).

Flujos de detritos

Según sugieren Sepúlveda et al. (2006) los flujos de detritos son los peligros geológicos más recurrentes en Chile. Esto lo emparentan al relieve escarpado que existe a lo largo de Chile, a la cercanía a un margen activo y, en muchas zonas, al clima, especialmente en el centro y sur del país, caracterizado por sus elevadas precipitaciones. Otro punto fundamental que destacan dichos autores es el inapropiado uso del terreno para el establecimiento de ciudades, muchas de ellas ubicadas sobre abanicos aluviales y otras sobre valles planos en zonas pedemontanas (Sepúlveda et al. 2006).

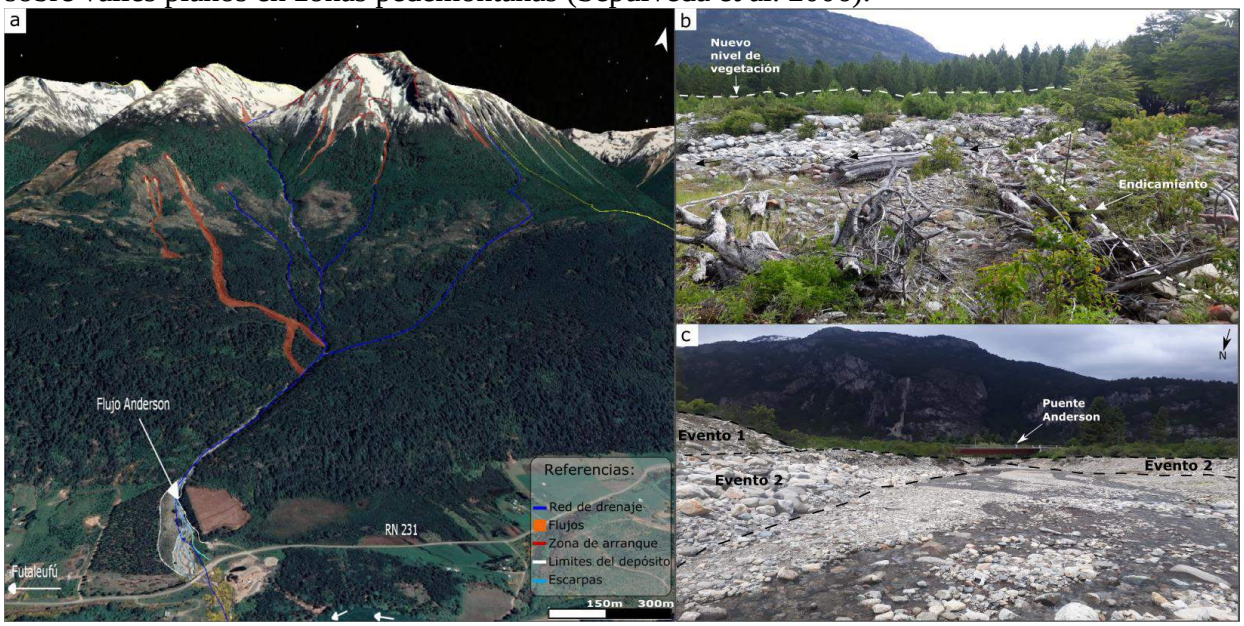


Figura 3. **a.** Imagen tomada de Google Earth, donde se muestra las zonas de aporte, los flujos en el valle y el depósito del flujo Anderson. **b**. Foto de campo, se observa el depósito, el nuevo nivel de vegetación y los endicamiento en el mismo depósito. **c**. Foto de campo mostrando el puente Anderson y la interpretación de los dos eventos que se habrían dado en el valle.

En las inmediaciones de Futaleufú, mediante el análisis de imágenes satelitales y los relevamientos de campo se detectaron numerosas evidencias de flujos de detritos. Particular atención, dada su cercanía a la ruta que conecta Futaleufú con Esquel, se prestó a la desembocadura del arroyo Anderson. Allí se identificó un depósito de abanico que interrumpe la vegetación de 0,03 km^2. A partir del motor de búsqueda Google Earth Engine, se pudo constatar que un evento de flujo ocurrió en este sector entre los años 2003 y 2004. El mismo se habría gatillado producto de un deslizamiento de ladera (ver Fig. 3a). Además analizando las imágenes se observaron indicios de haber ocurrido al menos un evento previo que dio origen al abanico.

En términos generales, este depósito de abanico tiene unos 400 m de largo hasta el puente y 120 m de ancho en su sección distal, está formado por clastos mal seleccionados que van desde los 2 cm, llegando a los 2 m de diámetro máximo. Además se observa una gran cantidad de troncos arrastrados por el mismo (algunos de los cuales provocaron endicamientos temporales), también se observan marcas de impacto en los árboles adyacentes al valle. Se realizaron una serie de perfiles sedimentológicos para caracterizar este abanico. Se reconoció que el mismo está formado por un depósito más antiguo (evento 1) ubicado a una cota mayor, y un depósito más joven (evento 2), sobre el que está labrado el cauce actual. Se pueden ver diferencias en el grado de colonización por parte de la vegetación sobre la superficie de ambos depósitos (ver Fig. 3b). Ambos poseen albardones laterales de materiales gruesos, de 1,30 m de altura, donde la selección es levemente mejor que en el resto de los depósitos. El evento 1 queda limitado al valle del arroyo y no supera el puente de la ruta 231, en cuanto al evento 2, se observa que los depósitos del mismo se extienden más allá de la ubicación del Puente Anderson, aunque no hay indicios de que el flujo lo haya afectado. En la base de estos depósitos, se encontraron depósitos fluviales y glaciarios, que quedan expuestos producto de la erosión fluvial.

Caída de rocas

Las caídas de rocas son procesos que involucran a la pendiente y gravedad, generando un desprendimiento de fragmentos de roca, con posterior caída, rebote, rolido, deslizamiento y deposición (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988). Sobre la ladera norte colindante con la localidad de Futaleufú se tomaron puntos GPS de las posiciones de los bloques desprendidos producto de este tipo de movimientos. Luego se realizaron, utilizando un software GIS y a partir de un DEM ALOS PALSAR 12,5 m, mapas de elevación y pendientes, con el objetivo final de realizar un modelado de caída de rocas con el software CONEFALL (ver Fig. 4a). Se observó que la pendiente asciende por sectores hasta los 51º, con un promedio de entre 26º y 32º. En el sector oriental se encuentran las mayores pendientes, y una mayor densidad de bloques hallados. Los bloques encontrados producto de la caída de rocas varían en tamaños que van desde los 0,4 m hasta 2,5 m de diámetro máximo. Muchos de éstos se encontraban detenidos por la vegetación o incluso por algunos alambrados de viviendas, que se encuentran muy cercanas a estos (ver Fig. 4b y 4c).

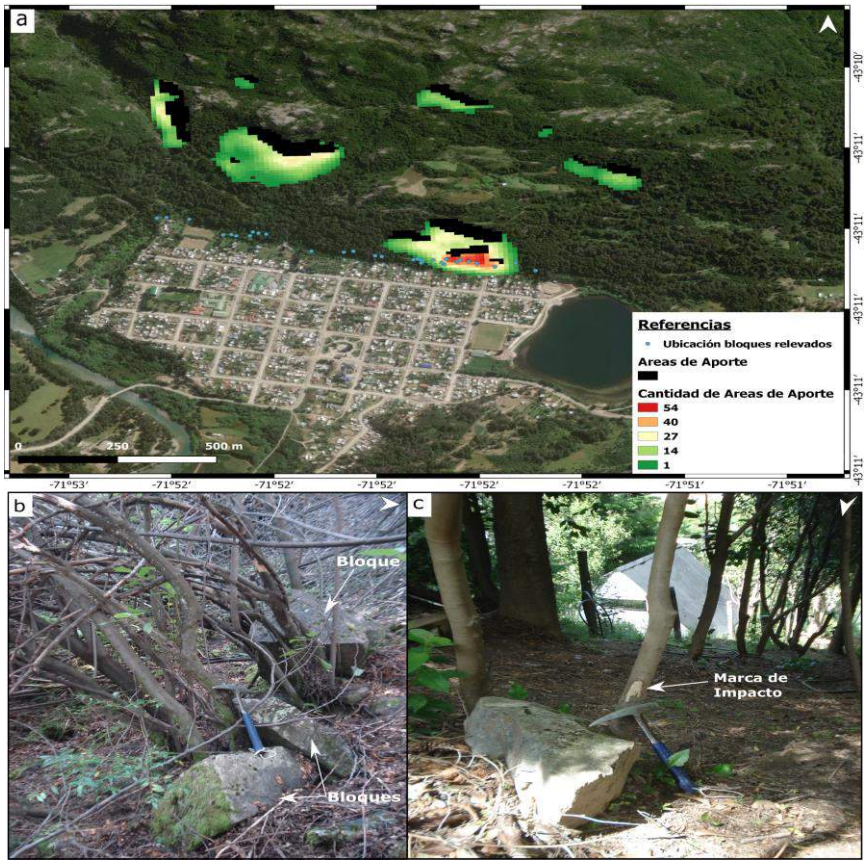


Figura 4. a. Resultado del modelado de caída de rocas a través del software CONEFALL (Jaboyedoff 2003). **b**. Fotografía tomada en el campo, donde se observan algunos de los bloques relevados con GPS, se observa como la vegetación sirve como barrera. **c.** Foto de campo donde se observa otro bloque y una vivienda a pocos metros.

Para realizar el modelado se tomaron como posibles áreas fuente todo aquel sector de la ladera analizada que muestre pendientes mayores a 45°. Se tomaron como posibles áreas de propagación de los bloques desde cada punto de aporte conos con ángulo de pendiente de reposo de 30°. Finalmente, se obtuvieron superficies con distintas probabilidades de caída de rocas, en base a la cantidad de áreas de aporte puntuales que pudieran contribuir con bloques a esa superficie determinada. Siendo las áreas de color rojo (ver Fig. 4a) las de mayor probabilidad de sufrir procesos de caída de roca, en el caso de las zonas de color verde corresponden a las de menor probabilidad.

Remoción en masa asociada a ruptura de diques naturales

Las inundaciones asociadas al desagote súbito de lagos glaciarios (conocidas a nivel local como aluviones o, en general, GLOFs - *Glacial Lake Outburst Floods*) constituyen el proceso más peligroso y más frecuente relacionado al retroceso de los glaciares a nivel mundial. La ruptura de morenas que endican lagos proglaciarios puede producir el vaciamiento total o parcial del lago, liberando millones de metros cúbicos en cuestión de minutos, con una capacidad erosiva y de transporte de material alta (Costa y Schuster, 1988; Richardson and Reynolds, 2000).

En las nacientes del arroyo Claudio, que limita al oeste al pueblo de Futaleufú, se identificaron mediante imágenes satelitales un conjunto de tres lagunas, dos de ellas

endicadas por morenas frontales (ver Fig. 5a). Mientras se realizó el viaje de campo ambas lagunas estaban parcial o completamente congeladas, por lo que las observaciones estuvieron parcialmente limitadas. Las lagunas se hallan rodeadas por afloramientos del Grupo Divisadero que muestran pendientes verticales a subverticales y un importante nivel de fracturación, como parte de un antiguo circo glaciar (ver Fig. 5b). En cuanto a los diques, las morenas están compuestas por grandes bloques (diámetros superiores a 1,5 m) en una matriz de arena fina a arcilla. Por sectores existen concentraciones de bloques de diámetros mayores, prácticamente sin presencia de matriz. La morena superior (laguna 1) se eleva unos 30 m aproximadamente por sobre el nivel de la laguna (ver Fig. 5b), mientras que en la laguna 2, el dique tiene una altura mínima por sobre el nivel del agua de solo 3 m(ver Fig. 5c), lo cual sugiere que podría ser más fácilmente desbordable. La tercera laguna está endicada por la roca (umbral glaciar).

Las represas producidas por morenas son inherentemente propensas a fallar debido a su débil estructura. Dicha estabilidad fue estudiada y depende principalmente de la geometría, la estructura interna, propiedades del material y la distribución de los tamaños de clastos (Costa y Schuster, 1988; Richardson y Reynolds, 2000; Korup y Tweed, 2007). Los principales mecanismos por los cuales la morena puede ceder son por la fisura directa de la misma o por el sobrepaso del nivel de agua de la laguna y posterior rotura de la misma. Ambos mecanismos pueden tener diferentes disparadores, entre los que se destacan condiciones de excesivas lluvias o de agua de deshielo y olas producidas por eventos tanto de remoción en masa, como avalanchas de nieve o caída de rocas ingresando al lago (Costa y Schuster, 1988; Emmer y Cochachin, 2013). Otro mecanismo relacionado directamente con la ruptura de las morenas también son los eventos sísmicos, ya que los temblores pueden favorecer pequeñas infiltraciones en los depósitos de la morena que terminan provocando la inestabilidad de la misma (Lliboutry et al., 1977).

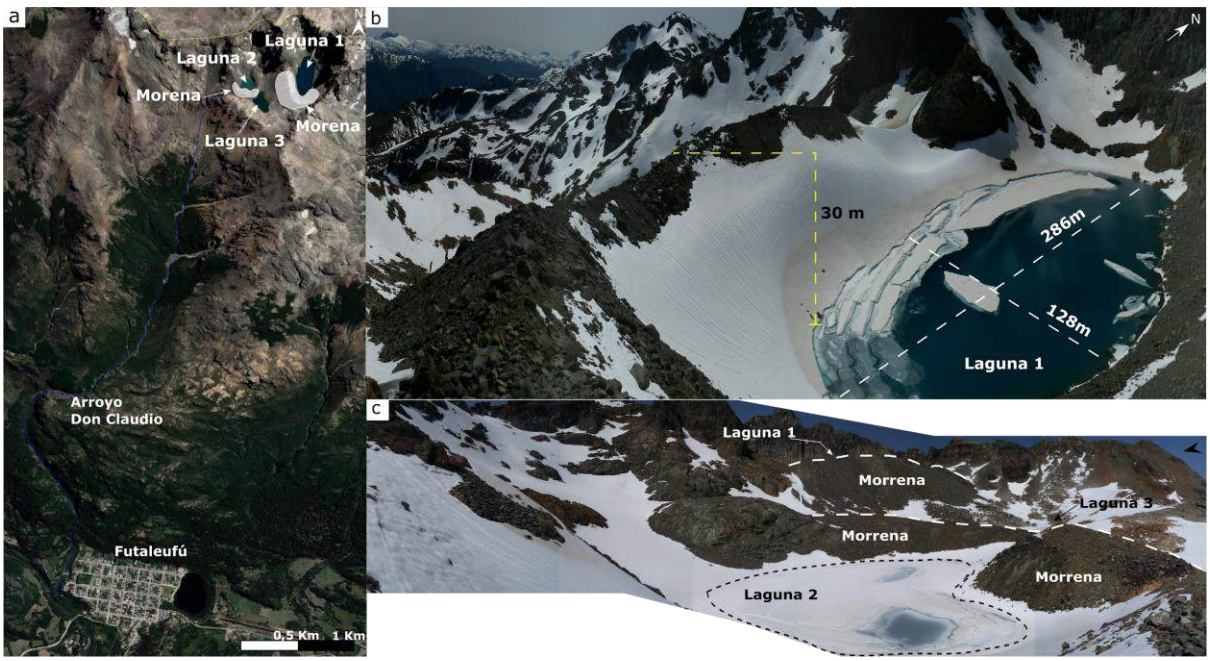


Figura 5. a. Imagen obtenida de Google Earth, se ubican las 3 lagunas, sus respectivas morenas y al arroyo Don Claudio. **b.** Foto de campo de la laguna 1 y su dique morrénico. **c.** Foto de campo de la laguna 2 y su dique morrénico.

Por otra parte se recorrieron los depósitos correspondientes al aluvión del lago Noroeste, cuyo análisis reviste principal importancia ya que el depósito de abanico se encuentra sobre un valle, el cual está poblado actualmente, y es una de las zonas hacia las que se está expandiendo la localidad de Futaleufú. Según relatos de pobladores locales, este proceso tuvo dos desencadenantes: el primero fue la existencia de una gran acumulación de troncos, producto de incendios ocurridos durante la década del '50 en la desembocadura del lago Noroeste (ver Fig. 6a). Estos produjeron un endicamiento que, según los relatos, generó un ascenso del nivel del agua de hasta 12 m. Luego, el desencadenante final de este movimiento fue el temblor producido por el sismo de Valdivia en 1960. Dicho movimiento desestabilizó el dique de troncos, liberando una gran cantidad de agua, junto con troncos y bloques que alcanzan los 6 m de diámetro (ver Fig. 6b y 6c). Sorpresivamente no hubo ningún reporte de heridos.

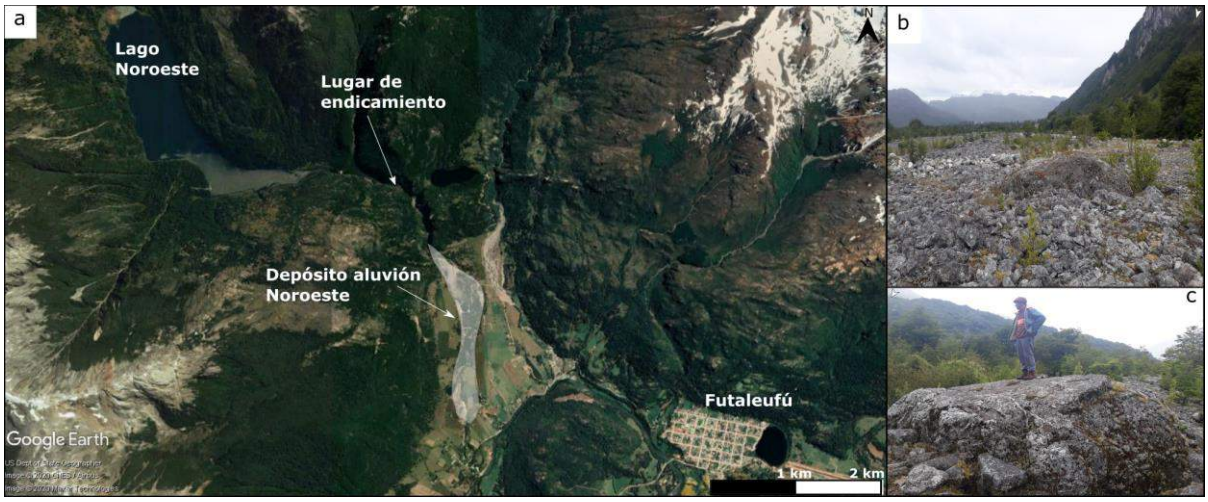


Figura 6. **a**. Imagen tomada de Google Earth, interpretada con los límites del depósito del aluvión Noroeste, se ubica la potencial zona de endicamiento. **b**. Foto de campo del depósito. **c**. Foto de campo donde se observa el tamaño de alguno de los bloques depositados por el aluvión.

CONCLUSIONES

El trabajo tiene como finalidad el reconocimiento de las principales amenazas en un área que abarca la localidad de Futaleufú y sus alrededores, comprendiendo a la Ruta 231, la cual es uno de los pasos internacionales entre Argentina y Chile. Se evaluaron las amenazas posibles en la zona, y se centró el estudio a los procesos de remoción en masa ya que son uno de los procesos que revisten mayor importancia en el área. Dicha determinación fue tomada basándonos en tres factores: la actividad sísmica, el clima y los antecedentes. El área de estudio se encuentra en una zona sísmicamente activa, con registro de sismos tanto por la actividad de la falla Liquiñe-Ofqui, así como algunos dados por el margen convergente desarrollado a lo largo del margen oeste dado por la convergencia de placas Sudamericana y Nazca. Las lluvias son otro de los principales desencadenantes. En Futaleufú se dan precipitaciones de más de 2000 mm anuales, siendo los meses invernales los que más aportan. Por último los antecedentes cercanos de Villa Santa Lucía (2017), la erupción y alud del Chaitén (2008) y eventos de menor magnitud como caída de rocas y flujos, que cortan las carreteras reiteradas veces y llevan a pérdidas económicas relevantes. Además, se realizó una encuesta a la población local la cual arrojó entre otros resultados, que los pobladores de Futaleufú se perciben expuestos a este tipo

de procesos. Se identificaron las principales amenazas, que pueden llegar a tener un potencial riesgo sobre la población o infraestructura, como flujos de detritos, eventos por endicamientos naturales y caída de rocas (ver Fig. 7).

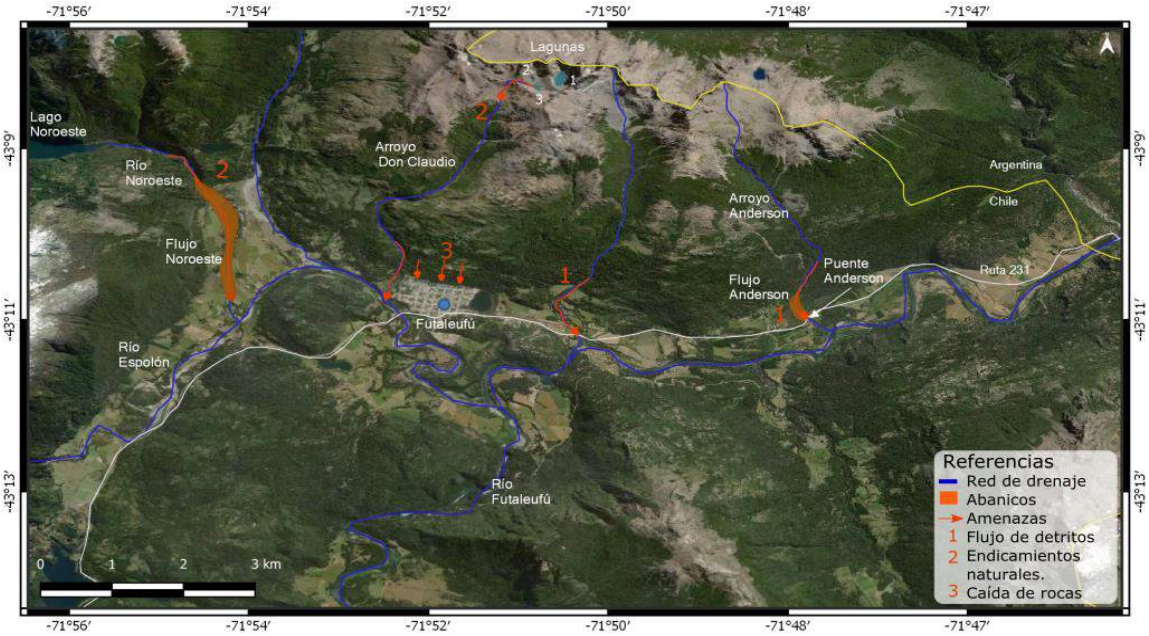


Figura 7. Mapa con las principales amenazas geológicas identificadas en los alrededores de Futaleufú ligadas a los procesos de remoción en masa.

En el caso de los flujos de detritos al este de Futaleufú, podrían ser una amenaza directa a la ruta 231, la cual comprende el paso internacional. En el flujo del Anderson se observó que el evento 2 observado en el campo, habría llegado a una mayor distancia a la cual se encuentra el puente Anderson. Las caídas de rocas son un proceso relevante ya que la zona afectada se halla aledaña al trazado urbano. Además coinciden tanto la mayor densidad de bloques observada en el relevamiento de campo y la mayor probabilidad arrojada por el modelado, en el sector noreste de Futaleufú. En dicho sector, se observa en el modelado que la zona de probabilidad de caída de rocas se solapa parcialmente con las viviendas, lo cual se condice con lo observado en el campo, donde se detectaron bloques en los jardines de las casas. Incluso muchos de estos no llegaron hasta los terrenos por la presencia de vegetación, que amortiguó el recorrido en algunos casos y en otros sirvió de retención. Así es que teniendo en cuenta la presencia de árboles de gran porte, cañas y otras variedades de vegetación, que juegan un rol primario en la reducción de esta amenaza, se sugiere establecer límites al avance de las edificaciones sobre el mismo.

El flujo del lago Noroeste, asociado a endicamiento natural producto de la acumulación de troncos, reviste principal importancia debido a que los depósitos se encuentran sobre un valle, el cual es uno de los sectores hacia los que se está expandiendo el pueblo de Futaleufú. En este mismo sentido, asociado a endicamientos naturales pero en este caso depósitos morrénicos, se estudiaron las nacientes del arroyo Don Claudio. Allí se identificaron tres lagunas. Es preciso realizar mayores estudios sobre las mismas ya que los procesos relacionados a una potencial ruptura de alguna de ellas o de las tres podría tener incidencia directa sobre una parte de la población ya que el arroyo Don Claudio, bordea por el oeste al pueblo.

El presente trabajo brinda información importante en cuanto a la identificación y descripción de las principales amenazas, que hasta el momento no habían sido descritas. Un paso posterior comprendería la confección de un mapa de riesgo, en base a las principales amenazas definidas anteriormente. El mapa de la Figura 7 se presenta a modo de resumen, señalando las principales amenazas geológicas identificadas en el área.

REFERENCIAS

Arancibia, G., Cembrano, J., & Lavenu, A. Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aisén, Chile (44-45oS). Revista geológica de Chile, 26(1), 03-22 (1999).

Beigt, D., Villarosa, G., Gómez, E. A., & Manzoni, C. Subaqueous landslides at the distal basin of Lago Nahuel Huapi (Argentina): Towards a tsunami hazard evaluation in Northern Patagonian lakes. Geomorphology, 268, 197-206 (2016).

Cembrano, J., F. Hervé, and A. Lavenu. The Liquiñe Ofqui fault zone: A long-lived intra-arc fault system in southern Chile, Tectonophysics, 259(1–3), 55–66 (1996).

Chaprón E., Ariztegui, D., Mulsow, S., Villarosa, G., Pino, M., Outes, V., Charlet, F. y Juvignié, E. Impact of 1960 major subduction earthquake in Northern Patagonia (Chile, Argentina). Quaternary International 158: 58-71 (2006).

Costa, J. E. Schuster, R.L. The formation and failure of natural dams, Geol. Soc. Am. Bull., 100, 1054–1068 (1988).

Duhart, P., Sepúlveda, V., Garrido, N., Mella, M., Quiroz, D., Fernańdez, J., ... & Hermosilla, G. Santa Lucía landslide disaster, Chaitén-Chile, The: origin and effects. In Association of Environmental and Engineering Geologists; special publication 28. Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library(2019).

Emmer, A. and Cochachin, A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas, AUC Geographica, 48, 5– 15 (2013).

Folguera, A., Ramos, V. A., Zapata, T., & Spagnuolo, M. G. Andean evolution at the Guañacos and Chos Malal fold and thrust belts (36° 30′–37° S). Journal of Geodynamics, 44(3), 129-148 (2007).

Hutchinson, J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In International symposium on landslides. 5pp.3-35(1988).

Jaboyedoff, M. CONEFALL 1.0: A program to estimate propagation zones of rockfall based on cone method. Quanterra, www.quanterra.ch (2003).

Keefer, D.K. Landslides Caused by Earthquakes, Geological Society of America Bulletin 95, 406–421 (1984).

Korup, O., Tweed, F. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. Quat. Sci. Rev. 26, 3406–3422 (2007).

Lliboutry, L., Arnao, B. M., Pautre, A., and Schneider, B.. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention, J. Glaciol., 18, 239–254 (1977).

Masiokas, M.H., Rivera, A., Espizúa, L.E., Villalba, R., Delgado, S. y Aravena, J.C. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281: 242-268 (2009).

McColl, S. T. Paraglacial rock-slope stability. Geomorphology, 153, 1-16 (2012).

Moreno, M.S., Bolte, J., Klotz, J. y Melnick, D. Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. Geophysical Research Letters 36: L16310 (2009).

Oppikofer, T. Morphologic description of the punta cola rock avalanche and associated minor rockslides caused by the 21 april Aysém earthquake(Patagonia, Southern Chile). Revista de la Asociación Geológica Argentina, 69(3), 339-353 (2012).
Flores, P., J. Cembrano, P. Sáncez-Alfaro, E. Veloso, G. Arancibia and T. Roquer.Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe Ofqui Fault System, Chile, Tectonophysics, 680, 192–210 (2016).
Rabassa, J., Rubulis, S., & Brandani, A. East-west and north-south snow line gradients in the northern Patagonian Andes, Argentina. World Glacier Inventory, IAHS-AISH Publication N, 8, 126 (1980).
Rabassa, J. Late Cenozoic glaciations in Patagonia and Tierra del Fuego. En Rabassa, J.(ed.) The Late Cenozoic in Patagonia and Tierra del Fuego, Elsevier, Developments in Quaternary Sciences 11: 151-204, Amsterdam (2008).
Richardson, S. D. and Reynolds, J. M. An overview of glacial hazards in the Himalayas, Quaternary Int., 65/66, 31–47 (2000a).
Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S., and Vargas, G. Recent catastrophic debris
flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response: Quaternary International, v. 158, p. 83–95, doi:10.1016/j.quaint.2006.05.031 (2006).
Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. Landslides induced by the April 2007 Aysén fjord earthquake, Chilean Patagonia. Landslides, 7(4), 483-492 (2010).
Varnes, D. J. Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33 (1978).
Wieczorek G.F. and Glade T. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Debris flow hazards and related phenomena (Jakob M, Hungr O, eds). Berlin Heidelberg: Springer, pp 325–362 (2005).
Zapata, T., & Folguera, A. Tectonic evolution of the Andean fold and thrust belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. Journal of the Geological Society, London, Special Publications, 252(1), 37-56 (2005).

ANÁLISIS DE RIESGO: COVID-19 VS. TERREMOTO. UN ESCENARIO POSIBLE

Maldonado N. G.[a], Cueto A.[ab], Maldonado I. A.[ab] y Buss D. L.[ab]

[a]*CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*

e-mail: ceredetec@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

El Gran Mendoza es el núcleo urbano expuesto al mayor riesgo sísmico del país y la ciudad de Mendoza en 1861 sufrió el terremoto más destructivo de la historia argentina al perder un tercio de su población. Estudios realizados en 2017 para un escenario similar con origen en la falla de la Cal estiman más de cuatro mil víctimas y más de 30% de pérdidas del valor expuesto. La pandemia generada por el virus del COVID-19 ha superado ampliamente el número de muertos del terremoto más significativo de los últimos cien años (San Juan, 1944) y ha puesto al sistema de salud mendocino al borde del colapso. Pero una problemática mayor se podría encontrar en el caso de que se produjera un terremoto, concatenando el riesgo sanitario con el riesgo sísmico. En este caso se requiere indicar a la sociedad cuáles serían las medidas de prevención y mitigación para dicho escenario, entendiendo que los habitantes ya tienen cierta preparación sobre la problemática sísmica. Esta pandemia está demostrando una correlación directa entre la enfermedad del COVID-19 y el índice de vulnerabilidad social frente a desastre ya elaborado. Un valioso auxiliar para planteo de escenarios es el uso de sistemas de información geográficos que permiten abordar la problemática geológica, geotécnica, habitacional y social en mapas que permitirían monitorear la superposición de eventos y orientar sobre las acciones de respuesta inmediata y rehabilitación de servicios ante riesgos concatenados.

Palabras Clave: COVID-19, terremoto, análisis de riesgo, resiliencia

INTRODUCCIÓN

El Gran Mendoza tiene el núcleo urbano sujeto a la mayor peligrosidad sísmica del país (INPRES, 1989). El 20 de marzo de 1861 sufrió el terremoto más destructivo del país que mató un tercio de su población. Los distintos eventos sísmicos han marcado la tecnología de las construcciones a través del tiempo con las actualizaciones de reglamentos, desde el primer reglamento de América en 1920 puesto en vigencia por la Municipalidad de la Ciudad de Mendoza (Ponte, 1987). Los estudios sobre el riesgo sísmico del Gran Mendoza se iniciaron después del terremoto del 25 de enero de 1985 (INPRES, 1989) y se han actualizado en 2015 (BID, 2016) y en 2017 (DINAPREM, 2018) coincidiendo en que el Gran Mendoza tiene la mayor peligrosidad sísmica del país y el mayor riesgo sísmico por su vulnerabilidad física y social (UNICIPIO, 2018).

Los desastres también pueden coincidir de manera completamente independiente entre sí, lo cual es un riesgo que se enfrenta actualmente con la actual crisis de COVID-19. En los pocos meses transcurridos desde el inicio de la pandemia COVID-19, han

ocurrido varios tipos de desastres, incluidas tormentas, inundaciones y terremotos. El riesgo de desastre se produce por una concatenación entre una amenaza y determinadas condiciones de exposición y vulnerabilidad. Es concatenación porque no se trata de una causalidad lineal entre estos elementos sino de una situación donde el riesgo responde a múltiples causas asincrónicas y que además se relacionan entre sí (Lavell et al, 2020).

La diferencia hoy es que el COVID-19 afecta a todos los países casi simultáneamente, independientemente de su riqueza o la calidad de su sistema de salud. Actualmente el número de víctimas por COVID-19 a nivel nacional ha superado el número de los 10.000 muertos del terremoto de San Juan de 1945 (CRED, 2020) y a nivel provincial está superando el número de muertos del terremoto de Lavalle de 1920 que fue de 400 muertos (ACLISA, 2020).

A nivel nacional el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo, (SINAGIR), (Ley 27.287, 2016) tiene por objeto integrar las acciones y articular el funcionamiento de los organismos del Gobierno nacional, los Gobiernos provinciales, Gobiernos municipales, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil, para fortalecer y optimizar las acciones destinadas a la reducción de riesgos, el manejo de la crisis y la recuperación. La Provincia de Mendoza ha adherido a la citada ley a través de la Ley 9037 (2017), resultando un factor clave para el avance en materia de vulnerabilidad y riesgo alineando las políticas provinciales al marco nacional, situación que se ha validado durante la pandemia por COVID-19.

ANALISIS DEL RIESGO

El riesgo históricamente no ha sido conceptuado de forma integral, sino de manera fragmentada de acuerdo con el enfoque de cada disciplina involucrada. Para estimar el riesgo, de acuerdo con su definición, es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también los factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades (Cardona, 2001), considerando que los riesgos no son sólo el resultado de un fenómeno natural, sino de un conjunto de procesos interrelacionados. De esta manera los riesgos se relacionan con los aspectos de vulnerabilidad de la población y del ambiente para producir la amenaza en un espacio y un tiempo específico (Figura 1).

Sin embargo, el primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. El conocimiento del riesgo es entonces un componente fundamental dentro del desarrollo sostenible (BID, 2016).

El riesgo es la probabilidad que una amenaza produzca daños al actuar sobre una población vulnerable, con una representación determinística en la Ec. 1. Las variables que se deben considerar en el análisis de riesgo se presentan en la Ec 2 (UNISDR, 2009).

El riesgo sísmico es una medida que combina el peligro sísmico, con la vulnerabilidad y la posibilidad de que se produzcan en ella daños por movimientos sísmicos en un período determinado. Una expresión más completa que incluye el aspecto socio-cultural

se expresa en la Ec. 3 donde la valoración de la capacidad mediante la resiliencia es de gran valor en regiones con amenazas permanentes (Turnbull et al, 2013).

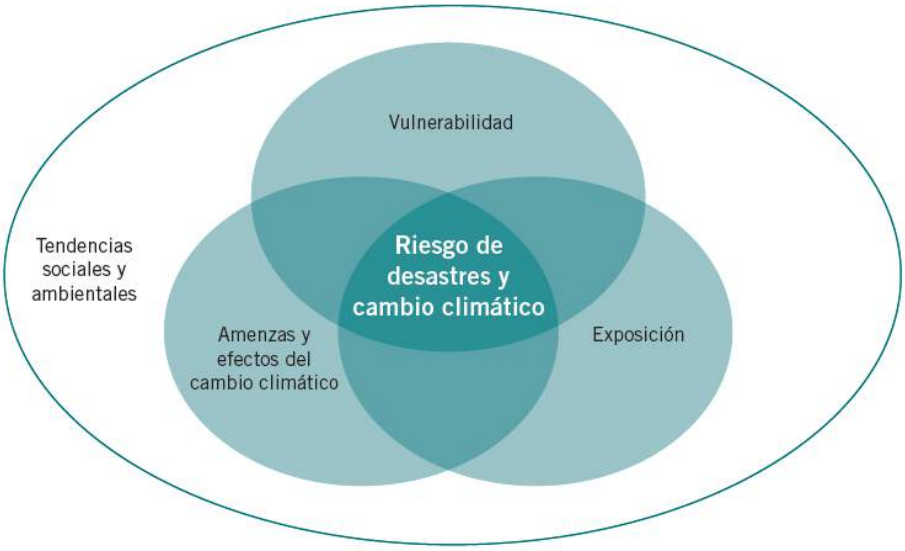


Figura 1: Interacciones entre factores para evaluar el riesgo (Turnbull et al. 2013)

$$R = R(p, V), \qquad \text{con } \frac{dR}{dp} \geq 0, \frac{dR}{dV} > 0 \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:
R : riesgo
p : peligro
V : vulnerabilidad

$$\boldsymbol{R}(Riesgo) = f\left(\frac{\boldsymbol{A}\ (Amenaza) \times \boldsymbol{V}\ (Vulnerabilidad)}{\boldsymbol{C}\ (Capacidades)}\right) \qquad \text{Ec. 2}$$

$$R(Riesgo) = f\left(\frac{P(Peligro)\ x\ E(Exposición)\ x\ V(Vulnerabilidad)}{R\ (Resiliencia)}\right) \qquad \text{Ec. 3}$$

La Ley 27287 (2016) establece que la gestión integral del riesgo es un proceso continuo, multidimensional, interministerial y sistémico de formulación, adopción e implementación de políticas, estrategias, planificación, organización, dirección, ejecución y control, prácticas y acciones orientadas a reducir el riesgo de desastres y sus efectos, así como también las consecuencias de las actividades relacionadas con el manejo de emergencias y/o desastres. Comprende acciones de mitigación, gestión de la emergencia y recuperación.

Actualmente hay en el riesgo una visión holística en que los desastres se consideran una fase o momento en el continuo de las condiciones de riesgo en la sociedad y no como un objeto de estudio e intervención autónomo (Herrero et al., 2018).

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

La primera evaluación científica del riesgo sísmico del Gran Mendoza corresponde a la Microzonificación sísmica del Gran Mendoza realizada por INPRES después del terremoto de 1985 (INPRES, 1989) en un sector importante del Área Metropolitana del Gran Mendoza (AMM).

El Banco Interamericano de Desarrollo realizó el Informe Nacional sobre el Perfil de Riesgo de Desastres (BID, 2016) que ha incluido el riesgo sísmico y de inundaciones, que sirven de base para proyectos financiables de Argentina.

Los Estudios de Base sobre "Desarrollo Urbano y el Cambio Climático: Huella Urbana Actual e Histórica, Escenarios de Crecimiento Urbano y Estudios Básicos sobre Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en el Área Metropolitana de Mendoza y Lavalle" detectaron como amenazas prioritarias las geodinámicas internas (sismicidad), las hidrometeorológicas – climáticas (lluvias intensas y/o granizadas) y las geodinámicas externas (aludes torrenciales o aluviones). Para la evaluación se han utilizado plataformas analíticas internacionalmente reconocidas como CAPRA (para la evaluación del riesgo derivado de la sismicidad) y HEC-HMS para la identificación de las cuencas que contribuyen con el riesgo derivado de las inundaciones y aludes torrenciales y el modelo MIKE-21 para obtener el riesgo incluyendo los efectos del Cambio Climático. La Figura 2 presenta la zonificación del riesgo sísmico de la Provincia de Mendoza y el mapa de fallamiento activo para el AMM (DINAPREM, 2017).

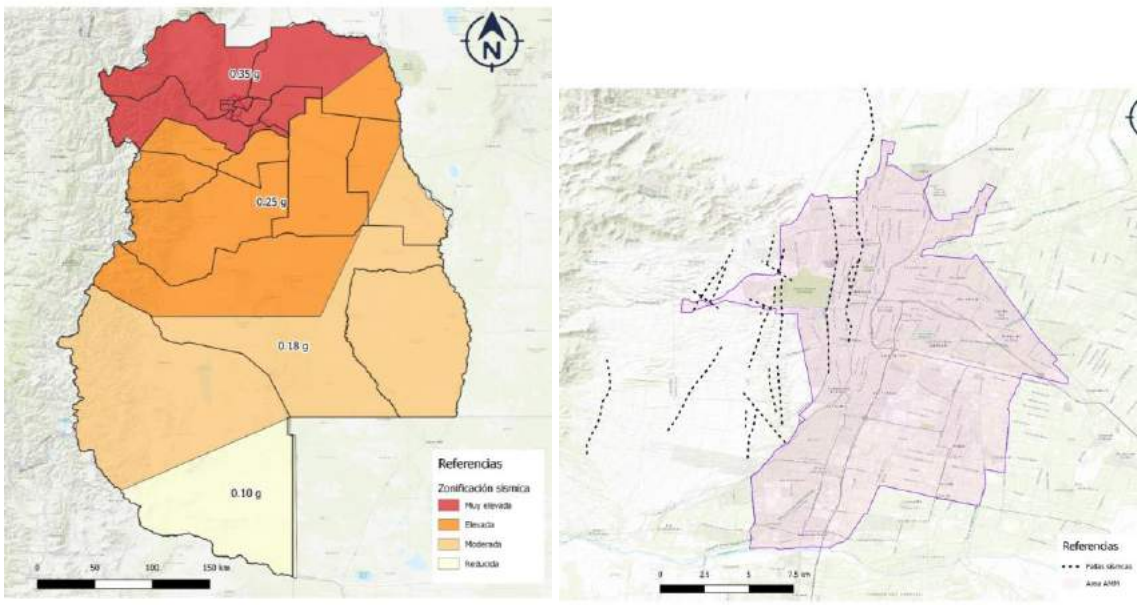


Figura 2. Distribución de la peligrosidad sísmica de la Provincia de Mendoza (izq.) y fallamiento sísmico del AMM (der.) (DINAPREM, 2017; UNICIPIO, 2018)

Este informe concluye que la sismicidad es la amenaza que mayor número de víctimas y afectados ocasionaría, según las estimaciones serían de más de 4.000 frente a los análisis probabilísticos para inundaciones y aludes torrenciales que esperan un valor por debajo del centenar de víctimas. En este escenario, la magnitud de los daños esperados es de 176.288 millones de pesos argentinos (34,1% del valor total expuesto). Resulta imprescindible que las autoridades provincial y municipal trabajen de manera articulada con las instituciones que presentan injerencia en el tema y aborden la temática de manera de mejorar la resiliencia de la ciudad y de sus habitantes (UNICIPIO, 2018).

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE PANDEMIA

Al analizar el problema generado por el virus del SARS-CoV-2 con los mismos parámetros adoptados para un desastre de origen natural se pueden hacer las siguientes consideraciones provisorias (Llavel et al, 2020).

El riesgo asociado con el virus se materializa como impacto directo en elevadas tasas de mortalidad y morbilidad en las personas en algunos rangos etarios y el stress y/o el colapso que provoca en el sistema de salud. El impacto indirecto es muy significativo por la interrupción o paralización de la actividad económica y los servicios sociales.

La diferencia con un desastre de base físico-natural, socio-natural o tecnológico es que los impactos indirectos no son consecuencia de los impactos directos (mortalidad) sino el resultado de las políticas de gestión del riesgo adoptadas por los países y las decisiones que toman los gobiernos para enfrentar el riesgo sanitario.

La amenaza de infección y el riesgo de trasmisión entre personas están determinados por el contacto entre individuos con el virus y con las superficies de contacto contaminadas.

Hay 2 mecanismos de prevención: el control del comportamiento humano y el control estructural de la enfermedad. Como medida del comportamiento humano hay que evitar el contacto personal con máscaras que funcionen y tomando medidas de higiene personal. Como medidas sobre la enfermedad se debe evitar total o parcialmente la exposición al virus hasta que se cuente con una vacuna para controlarlo y un programa masivo de vacunación o no haciendo nada y esperando que la autoinmunización del rebaño juegue su papel.

Además del comportamiento humano hay factores socialmente construidos que configuran la amenaza de infección. La fluidez y rapidez territorial por la cual se ha expandido territorialmente el virus tiene características muy particulares respecto a cualquier epidemia anterior con excepción de la gripe española (1918-1921).

La exposición al coronavirus se restringe a las personas que están en contacto con los cercanos o superficies a través de las cuales se puedan contagiar potencialmente. Como tal, una persona está expuesta en la medida en que su comportamiento y el de los demás lo promuevan. El virus no tiene maneras independientes de propagarse pero el territorio de la exposición es ilimitado. La exposición también depende de la organización del espacio urbano y del territorio. Los edificios multifamiliares en zonas densamente

pobladas, las viviendas precarias sin servicios básicos mínimos y la utilización del transporte público magnifican dramáticamente la exposición al virus por la proximidad.

Pero la exposición también depende de la estructura territorial de la sociedad y de sus patrones sociales y culturales (costumbres argentinas como compartir mate, asados, previas de fiestas, reuniones familiares, etc).

La vulnerabilidad al virus está configurada por la vulnerabilidad de las personas y los grupos sociales. Hay vulnerabilidad intrínseca y aspectos socialmente construidos.
La vulnerabilidad intrínseca es la manera en que la genética influye en el nivel de funcionamiento de los sistemas inmunológicos, la susceptibilidad a enfermedades coronarias, hepáticas, cáncer o infecciones crónicas. Son vulnerabilidades construidas en el tiempo como parte de la salud de un individuo. También son factores intrínsecos las condiciones de salud de un individuo que producto de sus propias decisiones como ser humano a través de los años, o por costumbres y prácticas familiares (hábitos alimentarios, consumo de sustancias nocivas, práctica o no de deportes, etc). Ante esta vulnerabilidad intrínsica hay que reducir la exposición.

También hay una relación estrecha entre la vulnerabilidad intrínseca y los vectores de riesgo cotidiano: desempleo, falta de ingresos, otras enfermedades, adicciones, inseguridad social y personal, condiciones precarias del hábitat y vivienda, falta de acceso a servicios básicos y de salud y protección social.

Los Estudios de Base sobre “Desarrollo Urbano y el Cambio Climático: Huella Urbana Actual e Histórica, Escenarios de Crecimiento Urbano y Estudios Básicos sobre Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en el Área Metropolitana de Mendoza y Lavalle” establece que la amenaza de sismicidad tiene mayor probabilidad de causar daños en aquellos barrios cuyas edificaciones e infraestructuras no cumplen con la normativa sismorresistente. Como resultado de este trabajo, se ha detectado que las áreas suburbanas que bordean al aglomerado del municipio de Ciudad de Mendoza, se corresponden con los estratos socioeconómicos más bajos de la estructura social, en donde se localiza el mayor porcentaje de viviendas precarias y hacinamientos. Cabe destacar que estas poblaciones presentan servicios urbanos básicos suficientes y cuentan con un alto porcentaje de adultos sin formación profesional/técnica y tasas elevadas de ausentismo escolar y desempleo (DINAPREM, 2017; UNICIPIO, 2018).

El Plan de Acción Área Metropolitana de Mendoza Sostenible (2018) ha detectado que uno de los principales problemas que afecta al sistema de la salud pública es la escasez de determinados especialistas médicos, sumado a una desequilibrada distribución territorial respecto a las especialidades. Adicionalmente, la falta de medicamentos, elementos básicos de higiene o indumentaria adecuada en los hospitales, cantidad de médicos especialistas por nosocomio, enfermeros, estado general de los establecimientos son algunos de los aspectos a fortalecer para que el servicio de salud del AMM mantenga niveles óptimos (UNICIPIO, 2018).

La situación descripta se ve agravada por las condiciones físicas de los centros de salud pública estatal, y la falta de inversiones en infraestructura sanitaria. Los centros de salud y otros efectores de zonas rurales presentan numerosas falencias de infraestructura y

servicios, si bien se ha relevado el estado de los equipamientos en los hospitales y centros de salud para verificar el estado general y las necesidades de los mismos (UNICIPIO, 2018).

La cobertura de salud según grupos de edad concluye que los jóvenes de entre 18 y 34 años son los que utilizan en mayor porcentaje al sector público como principal cobertura de salud (41,6%), mientras que aquellos entre 35 y 59 años son en mayor proporción los que tienen obra social o medicina privada como principal cobertura de salud (54,9% y 6,1% respectivamente). PAMI es la principal cobertura los mayores de 60 años (51,4%).

El indicador que caracteriza la problemática de AMM en el ámbito de provisión de servicios de salud es "la cantidad de médico cada 1000 habitantes". La situación respecto al número de médicos es altamente preocupante en toda el área y se agudiza respecto de algunas especialidades y según localizaciones. Los indicadores se encuentran muy por debajo del valor mínimo deseado, colocando al AMM en el semáforo rojo, siendo 200 el número mínimo de médicos para que el semáforo sea verde, según los benchmarks establecidos por el BID con referencia a países similares de América Latina y el Caribe (UNICIPIO, 2018).

Tanto los establecimientos sanitarios públicos como privados se encuentran muy dispersos para todo el AMM. Se distinguen hospitales públicos, hospitales o clínicas privadas y centros de salud públicos (Figura 3). En el AMM hay un total de 12 hospitales destinados a diferentes especialidades, siendo el Hospital Central en Ciudad de Mendoza, el nosocomio provincial de referencia en alta complejidad. A excepción de Luján de Cuyo, que no está dotado de servicios hospitalarios, los demás municipios albergan al menos uno. Por otro lado, en cada municipio hay una extensa cantidad de centros de salud de diferentes especialidades. Es por ello que todos los municipios quedan cubiertos de atención sanitaria primaria (UNICIPIO, 2018).

La disponibilidad de camas es crítica en los municipios de Godoy Cruz y Maipú y se encuentra en situación de alerta en Las Heras. Sin embargo, el alto valor del indicador para Ciudad de Mendoza y su ponderación hacen que el indicador general se encuentre por encima del valor óptimo, dado que es un indicador que refleja el grado de centralización de la política de salud en la Ciudad de Mendoza (UNICIPIO, 2018).

El informe sostiene que desde hace tiempo, el sistema de la salud pública estatal de Mendoza no posee las condiciones óptimas que se requiere. El brindar atención sanitaria de calidad para los mendocinos que dependen exclusivamente de los hospitales y centros de salud gestionados por el Estado provincial constituye un desafío para fortalecer el desempeño en el ámbito de la salud (UNICIPIO, 2018).

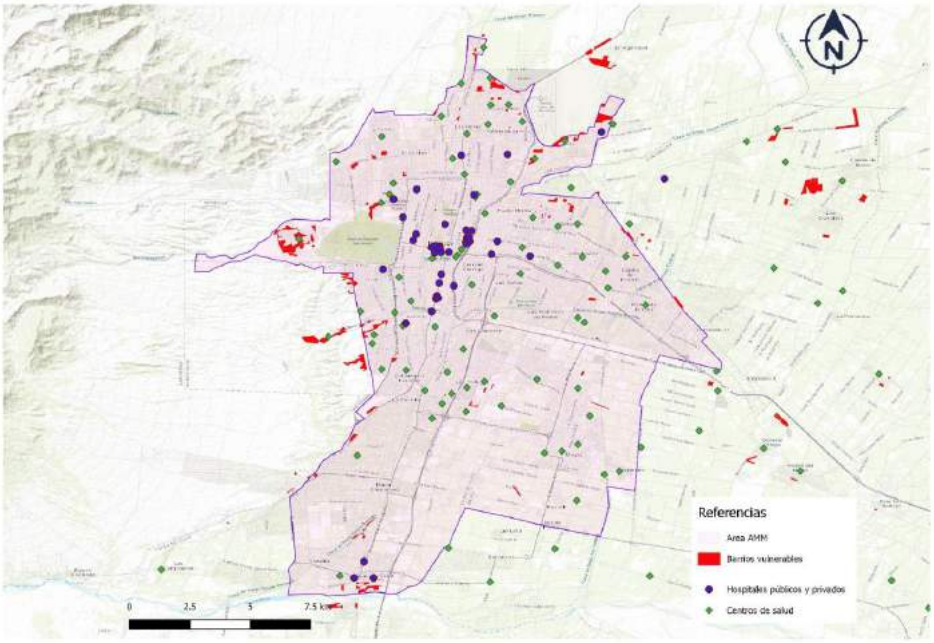


Figura 3. Distribución de lugares de atención sanitaria en el AMM (UNICIPIO, 2018) y barrios vulnerables (SIGIDE IDEMZA, 2020)

RIESGOS CONCATENADOS

El riesgo se puede resignificar y agravar el riesgo sísmico produciendo escenarios concatenados, en lugares donde la salud pública está ya comprometida o colapsada por el COVID-19.

Si se superpone el mapa de distribución del índice de vulnerabilidad social elaborado en el proyecto PIRNA (MINCYT, 2018) del AMM (Fig. 4) con los resultados de la distribución de enfermos por COVID-19 (Fig. 5) (ACLISA, 2020) se puede apreciar una notable coincidencia. Este tipo de vulnerabilidad es mayor en los estratos más pobres de los países en desarrollo (y dentro de ellos se consideran más vulnerables los grupos de niños, mujeres y ancianos), por cuanto su capacidad de preparación, respuesta y recuperación ante eventos perturbadores es muy reducida, consideración muy importante para evaluar la resiliencia (Ec. 3).

UNICIPIO (2018) señala que no existen mapas de riesgo para cada municipio y para el conjunto del AMM donde se identifiquen claramente las amenazas, la población y equipamiento expuesto. De los siete municipios pertenecientes al AMM, sólo uno cuenta con un plan de contingencia en caso de desastre lo que expone urgencia en actualizar este tipo de información y elaborar un plan de respuesta adecuado para diferentes tipos de amenazas. Tampoco se cuenta con un sistema de alerta temprana y el presupuesto municipal asignado es escaso. Esto da cuenta de que el AMM se encuentra muy alejada de los que supone una ciudad con capacidad de adaptación al cambio climático.

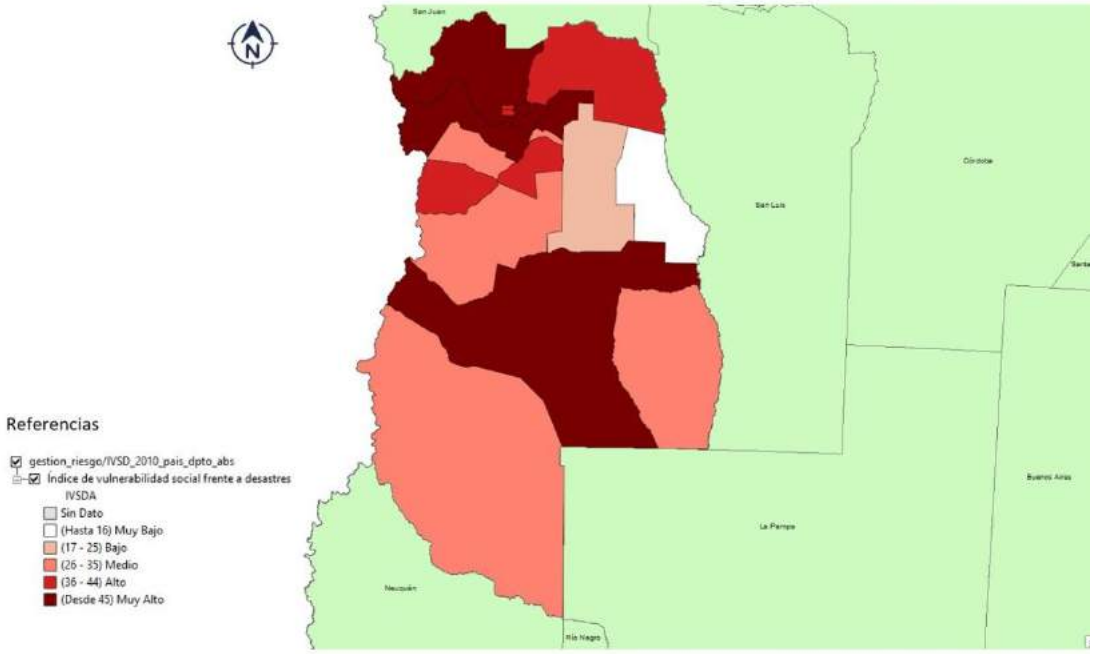


Figura 4. Distribución del índice de vulnerabilidad social de Mendoza (MINCYT, 2018)

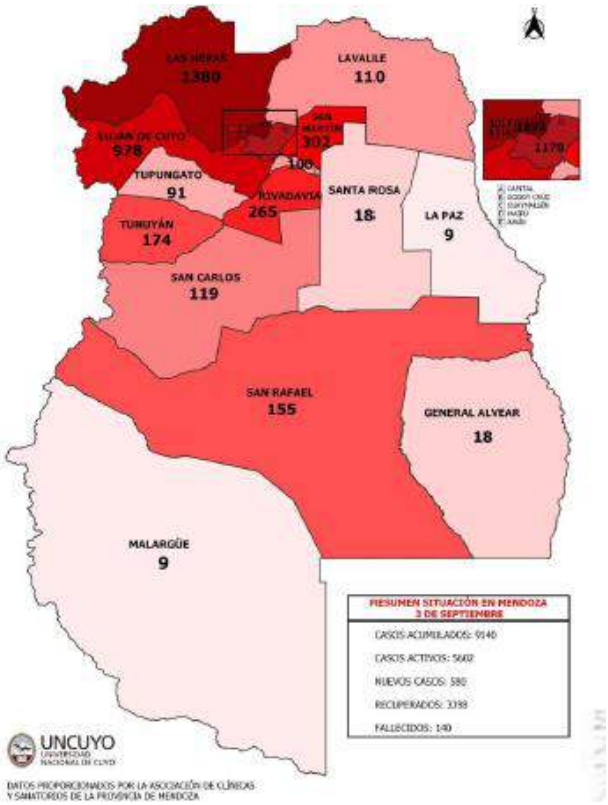


Figura 5. Distribución de enfermedad COVID-19 al 07/09/2020 (ACLISA, 2020)

Si a estos mapas se sumara la problemática de la peligrosidad sísmica del AMM se podría observar que la problemática sanitaria aumentaría si se dieran en forma simultánea un terremoto significativo con la enfermedad COVID-19.

Un valioso auxiliar para el planteo de escenarios es el uso de los sistemas de información geográficos que permiten abordar la problemática geológica, geotécnica, habitacional y social en mapas que permitirían monitorear la superposición de eventos y orientar sobre las acciones de respuesta inmediata y rehabilitación de servicios ante riesgos concatenados. El Visualizador SIGIDE habilitado en Mendoza en agosto de 2020 constituye una importante herramienta de acceso e intercambio de los datos geoespaciales y permitirá ser la base de las políticas públicas referidas a planificación, proyectos y prevención de riesgo, dentro del ámbito provincial (IDEMZA, 2020), que durante la epidemia por COVID-19 puede aportar datos específicos sobre ubicación de hospitales, laboratorios, consultorios médicos, fábricas de lavandina y jabones, geriátricos, clubes.

CONCLUSIONES

Este análisis da una clara señal de alerta de la limitada capacidad de respuesta que existe en los sistemas de salud para atender un desastre sanitario de esta magnitud combinada con otro riesgo natural, lo cual podría ser una catástrofe en el AMM.

Este escenario requiere que en el AMM se plantee a nivel de gestión cómo proceder cuando se presente un evento sísmico significativo en coincidencia con una pandemia, impulsando el aspecto de resiliencia de la población y el mantenimiento de la infraestructura.

El COVID-19 marca un nuevo paradigma. ¿Es razonable y realista intentar reducir el riesgo, a un mundo sin contagios por el coronavirus o muertos por el COVID-19 o sería más razonable apuntar a un nivel de riesgo aceptable, en el que el coronavirus se vuelva una amenaza más con la cual se debe convivir en el mundo? Tanto en el aspecto de riesgo sísmico como sanitario la disminución de la vulnerabilidad social es imprescindible. Tanto el estado como los privados deben tomar medidas para reducir esa variable donde la educación y la comunicación juegan un rol muy importante.

La catástrofe del COVID-19 revela justamente lo que desastres anteriores también revelaron, la necesidad de reducir desigualdad, pobreza y exclusión para lograr también la reducción de riesgos y que haya mecanismos efectivos de gobernanza del riesgo sistémico a nivel local, nacional e internacional.

REFERENCIAS

Asociación de Clínicas y Sanatorios de la Provincia de Mendoza (ACLISA). *Informe de Situación Epidemiológica COVID19. Semana del 28 de agosto al 03 de setiembre del 2020*

Cardona, O. *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (2001).

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) https://cred.be/ (2020)

BID. *Nota técnica Nº IDB-TN-1082. Perfil de Riesgo de Desastres. Informe Nacional para Argentina.* Marzo 2016.

Dirección Nacional de Preinversión Municipal (DINAPREM). *Desarrollo Urbano y el Cambio Climático: Huella Urbana actual e histórica, escenarios de crecimiento urbano y estudios*

básicos sobre mitigación y adaptación al Cambio Climático en el Área Metropolitana de Mendoza. Informe final – noviembre 2017.

Gobierno de Mendoza. SIGIDE (Sistema de Gestión de Información de Datos Espaciales). http://idemza2.mendoza.gov.ar. 2020.

Herrero, A. C.; Natenzon, C. y Miño, M. *Vulnerabilidad social, amenazas y riesgos frente al cambio climático en el Aglomerado Gran Buenos Aires.* Documento de Trabajo N°172. Buenos Aires: CIPPEC. Octubre 2018.

INPRES. *Microzonificación sísmica del Gran Mendoza.* 1989.

Lavell A., Mansilla E., Maskrey A. y Ramírez F. *Herramientas para interpretar la pandemia COVID-19: desastre, políticas públicas y gestión del riesgo*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) y la Risk Nexus Initiative (RNI). Abril 15, 2020.

Ley 27287. Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil/ Decreto 1114/16

Ley 9037. Gobierno de Mendoza, 26 de diciembre de 2017.

Ministerio de Ciencia, Tecnología e InnovaciónSecretaría de Articulación Científico TecnológicaRed de organismos científico-técnicos para la gestión integral del riesgo https://www.argentina.gob.ar/ciencia/sact/gestion-del-riesgo?p=ministerio&idEstructura=112

Ponte R. *Mendoza Aquella ciudad de barro.* Municipalidad de la Ciudad de Mendoza (1987).

Turnbull M., Sterrett Ch., Hilleboe A. *Hacia la Resiliencia Una Guía para la Reducción del Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático*. Practical Action Publishing Ltd. 2013.

UNICIPIO. *Plan de Acción Área Metropolitana de Mendoza Sostenible*. Marzo 2018.

UNISDR. *Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres*. 2009.

MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES BASADOS EN IMÁGENES SAR: VOLCÁN LANÍN

Marsilli D. J. A.[a], Balbarani S.[abc] y Monteros E.[ade]

[a] *Departamento de Agrimensura - FIUBA - UBA - ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ingeniería del Ejército - UNDEF - ARGENTINA*
[c]*SpaceSUR - ARGENTINA*
[d]*Subcomisión Técnica - COPLA - ARGENTINA*
[e]*Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva - SNDM - ARGENTINA*

e-mail: dmarsilli@fi.uba.ar

RESUMEN

Los modelos digitales de elevaciones (MDE) son herramientas de gran utilidad para planificación y diseño de obras de ingeniería, modelado de mapas de riesgos, delimitación de cuencas, procesamiento avanzado de imágenes, entre otras aplicaciones. Actualmente, los MDE libres, ya sean locales o globales, poseen una resolución espacial a partir de 30 metros, pudiendo ser inapropiado su uso para determinados requerimientos. Mediante la tecnología de radar de apertura sintética (SAR) es posible generar MDE con mayor resolución espacial (3 a 20 metros) de manera rápida y eficiente, sobre grandes extensiones, y con la posibilidad de prescindir de mediciones en el terreno (sin uso de puntos de apoyo). El presente trabajo de investigación se enmarcó en el desarrollo de una tesis de grado cuyo objetivo fue estudiar la capacidad de la tecnología SAR en banda X, C y L, para la obtención de MDE sobre zonas complejas y de acceso dificultoso. El área de estudio estuvo focalizada en una región de 21,5 km x 18,5 km que incluye al Volcán Lanín y su entorno, en la provincia de Neuquén, la cual presenta una topografía abrupta. Se utilizaron una serie de productos satelitales de las misiones COSMO SkyMed, ALOS-Palsar y Sentinel-1, y se diseñó e implementó una metodología ágil de procesamiento interferométrico a partir de pares de imágenes de adquisiciones repetidas. Los modelos topográficos obtenidos fueron comparados con el MDE-Ar v2.0 30m (Modelo Digital de Elevaciones de Argentina) para determinar la calidad de los mismos. Los resultados muestran que los MDE obtenidos mejoran su precisión a partir de la combinación de múltiples modelos, sin embargo, no alcanza para lograr el nivel de calidad del modelo oficial MDE-Ar.

Palabras Clave: Teledetección - Interferometría SAR - MDE - Calidad

INTRODUCCIÓN

Los modelos digitales de elevaciones (MDE) tienen gran relevancia, tanto en el ámbito científico como desde un punto de vista socio-económico. A nivel de ciencia, juegan un rol importante en la navegación, hidrología, modelado, geología y otras geociencias. En tanto, las sociedades se ven beneficiadas con la información topográfica, por ejemplo, para predicción y gestión de inundaciones, anegamientos y catástrofes naturales. Los MDE son un insumo fundamental para el monitoreo del medio ambiente (Ferrero, 2004). Un modelo topográfico puede obtenerse a partir de la captura de datos de la teledetección satelital. Las técnicas se basan en la observación de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas que operan en diferentes regiones del espectro electromagnético. El rango ocupado por las microondas opera con longitudes de onda que van desde 1mm hasta 1m, aproximadamente, otorgando características especiales para la

detección remota. La teledetección activa en microondas recoge información del sistema tierra-atmósfera, a partir de la emisión de un haz de energía generado por el propio sistema remoto. La forma más común es el radar (RAdio Detection And Ranging), que transmite una señal electromagnética hacia el objeto y recoge parte de la energía retro-dispersa. Miden la intensidad de la señal, así como el tiempo de retardo (y por ende la distancia sensor-objeto) (Schowengerdt, 2007).

Un sensor de radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés) es un sistema de radar coherente que mediante la observación lateral simula una antena extremadamente larga para generar imágenes de alta resolución (Oliver & Quegan, 2004). Una de las aplicaciones más interesantes es el mapeo topográfico, mediante la técnica denominada Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), con precisiones similares a los obtenidos por los sistemas satelitales ópticos (Hanssen, 2001).

InSAR es una técnica geodésica de la teledetección que utiliza la información en la fase de las imágenes para, por ejemplo, generar modelos digitales de elevación (MDE) de la zona observada. Se basa en el fenómeno físico de interferencia de dos señales (experimento de la doble rendija de Young), en el que se adquiere un par de imágenes desde posiciones ligeramente diferentes en el espacio y en diferentes momentos (InSAR Pasada Repetida). Interferometría SAR presenta ciertas ventajas en relación a otros métodos de la teledetección. Sin embargo, esta tecnología muestra ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta a la hora de su aplicación. La característica más interesante es que la señal SAR penetra las nubes y la lluvia, y de esta manera, las adquisiciones son insensibles a casi toda condición atmosférica, y al momento del día de la adquisición (diurno / nocturno). Esto hace de esta tecnología fundamentalmente útil en comparación con otras técnicas que operan en el rango óptico (Hanssen, 2001).

InSAR permite generar MDE sobre áreas extensas (miles de kilómetros cuadrados) y a bajo costo en relación a otros métodos convencionales (relevamiento GNSS o fotogrametría). Posee la capacidad de proveer valores espacialmente continuos y regulares de la elevación del terreno en formato digital, siempre y cuando se mantenga la coherencia interferométrica (Hanssen, 2001).

La fase interferométrica contiene información relevante, ver Ec. (1). Extraer con cierta precisión la componente de fase topográfica resulta una tarea compleja y laboriosa.

$$\Delta\varphi=\Delta\varphi_{tp}+\Delta\varphi_{e}+\Delta\varphi_{d}+\Delta\varphi_{at}+\Delta\varphi_{r} \quad (1)$$

Donde $\Delta\varphi_{tp}=-\frac{4.\pi}{\lambda}.\frac{B_{\perp}.u}{R_i.tan(\theta)}$ es la fase de tierra plana, que es la contribución de fase debido a la curvatura de la tierra, donde u es el desplazamiento en rango inclinado entre los objetivos puntuales; $\Delta\varphi_{e}=-\frac{\Delta z}{sen(\theta)}.\frac{B_{\perp}}{R_i}.\frac{4.\pi}{\lambda}$ es la contribución topográfica a la fase interferométrica, donde Δz es la diferencia de altitud entre el punto observado y una superficie de referencia; $\Delta\varphi_{d}=\frac{4.\pi}{\lambda}.D$ es la contribución de la deformación de la superficie a la fase interferométrica, donde D es el desplazamiento del objeto puntual en el intervalo de tiempo de revisita; $\Delta\varphi_{at}$ es la contribución atmosférica a la fase interferométrica, debido al cambio en humedad, temperatura y presión entre las dos adquisiciones; $\Delta\varphi_{r}$ es el ruido de fase introducido por el cambio temporal de dos dispersores, diferente ángulo de vista, y la dispersión por volumen (ESA & ESTEC, 2007).

La configuración de las adquisiciones introduce serias distorsiones geométricas relacionadas con la topografía de la zona observada. Estos fenómenos se denominan: 1)

acortamiento; 2) inversión; y 3) sombra, y deben tenerse en cuenta a la hora de elaborar un MDE de calidad (Curlander & McDonough, 1991).
El éxito práctico en la generación de un MDE mediante la técnica InSAR radica fuertemente en la conservación de la coherencia interferométrica. Dicha coherencia está definida por el coeficiente de correlación de fase entre ambas adquisiciones y disminuye principalmente como consecuencia de dos fenómenos (Zebker & Villasenor, 1992):

- Imágenes tomadas desde puntos de vista muy diferentes (decorrelación geométrica)
- Cambios de naturaleza aleatoria en las características de la superficie observada entre adquisiciones (decorrelación temporal).

Otra limitación a tener en cuenta es la condición atmosférica al momento de las observaciones. La atmósfera constituye un medio de propagación de la energía distinto del vacío, o sea que tiene un índice de refracción que depende de variables tales como la densidad electrónica en la ionosfera, y la presión, temperatura y humedad en la troposfera. Dichas variaciones introducen efectos de curvatura y retardo en la propagación de la señal electromagnética. Cuando se trata de fase interferométrica, tales retardos contribuyen a la misma si las condiciones atmosféricas son distintas en el momento de la adquisición de las imágenes (Hanssen, 2001).
El índice de coherencia se estima como el valor absoluto de la coherencia local (γ), ver Ec. (2), en una ventana móvil que cubre la imagen SAR conjunto. El valor de la coherencia va de cero (solo ruido) a uno.

$$\gamma = \frac{\sum_m F_M . \overline{F_S}}{\sqrt{\sum_m |F_M|^2 \cdot \sum_m |F_S|^2}} \tag{2}$$

Donde m es el número de píxeles, F_M es el valor de la celda de la imagen maestra, F_S es el valor de la celda de la imagen esclava y $\overline{F_S}$ es el conjugado de F_S. Un valor bajo de coherencia nos indica la buena calidad del par de imágenes (entre 0,7 y 1), valores bajos de coherencia pueden indicar que las imágenes tienen una mala relación señal/ruido (entre 0 y 0,5) (ESA & ESTEC, 2007).
Por último, el conocimiento exacto y preciso de la información orbital de los sistemas satelitales SAR es muy importante para la aplicación de Interferometría. Los errores en las posiciones de las órbitas pueden afectar la calidad de los productos interferométricos. En los interferogramas, este fenómeno aparecerá como patrones de fase adicionales en forma de rampas (ESA & ESTEC, 2007).

ESTIMACIÓN DE LA ELEVACIÓN

Obtención de alturas: La altura de un punto, ver Ec. (3), se puede calcular a partir de la fase interferométrica, ver Ec. (1), bajo una serie de suposiciones (ESA & ESTEC, 2007).

$$z = -\frac{\lambda . R_i . \mathrm{sen}(\theta) . \Delta\varphi}{4 . \pi . B_\perp} \tag{3}$$

Altura de ambigüedad: la altura de ambigüedad (h_a) se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase interferométrico de $2.\pi$, ver Ec. (4). La misma es inversamente proporcional a la línea de base perpendicular (ESA & ESTEC, 2007).

$$h_a = \frac{\lambda . R_i . \mathrm{sen}(\theta)}{2 . B_\perp} \tag{4}$$

Estimación del error en elevación: la dispersión de la fase (σ_φ) se puede explotar para estimar la dispersión de elevación teórica (σ_z), limitado a las altas frecuencias espaciales, de un MDE, ver Ec. (5) (ESA & ESTEC, 2007).

$$\sigma_z=\sigma_\varphi.\frac{\lambda.R_i.\,sen\,(\theta)}{4.\pi.B_\perp} \tag{5}$$

La relación exacta entre la dispersión de fase interferométrica y la coherencia se puede encontrar a través de un cálculo matemático complicado. Sin embargo, si el número de *looks* (*NL*) es mayor que cuatro, se promedian los píxeles independientes con la misma coherencia después de la compensación de la topografía (interferograma con *multilook*) y se cumple una aproximación simple, ver Ec. (6) (ESA & ESTEC, 2007).

$$\sigma_\varphi=\frac{1}{\sqrt{2.NL}}.\frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \tag{6}$$

MDE: LOS ERRORES Y SU TRATAMIENTO

Un modelo digital de elevaciones (MDE) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Históricamente, los MDE se han distinguido en función de la representación de la información: vectorial y ráster (Felicísimo, 1994). Por otro lado, los MDE pueden clasificarse de acuerdo a la forma de recolección de los datos: técnicas terrestres de la ingeniería en agrimensura (nivelación tradicional, relevamiento GNSS / Estación Total), y técnicas aéreas / satelitales de la teledetección (SAR, LIDAR, fotogrametría) (Ferrero, 2004).

Los errores presentes en los MDE se clasifican en tres categorías principales: Errores groseros, Errores sistemáticos y Errores accidentales o aleatorios. La presencia de un error sistemático lleva a que las observaciones no sean válidas, y un error aleatorio elevado lleva a que no sean fiables. Además, los errores en los MDE pueden ser separados en dos categorías secundarias: los errores posicionales implican una deficiente localización geográfica de la cota o de la trayectoria de la curva de nivel y afectan, por tanto, a la situación en el plano *xy*; los errores atributivos suponen una asignación imprecisa de la altitud asociada a la cota o a la curva de nivel e implican a las coordenadas en el eje *z* (CONAE, 2019).

Un primer paso a seguir es el de eliminar los errores groseros que aparezcan en el MDE. Luego se corrigen los errores sistemáticos, aplicándole movimientos rígidos al MDE que permitan situarlo en una posición óptima respecto a una nube de puntos de corrección. Estos pueden ser divididos en movimientos en el plano *xy* y movimientos en *z*, ya que es necesario tratarlos por separado. Suponiendo en primera instancia que el modelo está georreferenciado y solamente tiene errores atribuibles a un desplazamiento en *z*, es posible ajustarlo planteando la minimización del error en cota en algún sentido.

El criterio elegido para calcular el desplazamiento que es necesario aplicar al MDE es la minimización de la suma del cuadrado de los errores puntuales, esto es, mínimos cuadrados. Este cálculo lleva a la obtención de un desplazamiento necesario, ver Ec. (7).

$$d=\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_{z_i}}{n} \tag{7}$$

Donde *d* es el desplazamiento en *z*, el error de altitud (δ_{z_i}) en un punto P_i se define como la diferencia z_i-$\bar{z}_i$, donde el primer dato es la altitud del punto P_i en el modelo, y el segundo

es la altitud "real" o de referencia, extraída de una fuente de datos precisa, *n* es el número de puntos utilizados, e *i* es el índice de suma (Euillades & Vénere, 2003).
Eliminando los errores groseros y corrigiendo los errores sistemáticos, se procede a estimar la incertidumbre de carácter aleatorio. La cuantificación del error sobre un MDE matricial puede realizarse por comparación de un conjunto de valores conocidos de altitudes con los correspondientes de puntos homólogos del modelo, usando pruebas estadísticas convencionales.
Los estadísticos del error deben calcularse con un número suficiente de puntos homólogos (*n*) convenientemente distribuidos sobre el mapa. Para este conjunto de datos se define el error medio (*EM*), ver Ec. (8), el error estándar de las desviaciones (S_{δ_z}), ver Ec. (9), y el error cuadrático medio (*ECM*), ver Ec. (10) (Felicísimo, 1994).

$$EM=\bar{\delta}_z=\frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}\delta_{z_i} \tag{8}$$

$$S_{\delta_z}=\sqrt{\frac{1}{n-1}.\sum_{i=1}^{n}(\delta_{z_i}-\bar{\delta}_z)^2} \tag{9}$$

$$ECM=\sqrt{\frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}\delta_{z_i}{}^2} \tag{10}$$

El estadístico *EM* representa la magnitud del sesgo o validez de las observaciones (error sistemático), el S_{δ_z} la precisión o fiabilidad (error aleatorio), y el ECM la exactitud (error absoluto). Juntos infieren sobre la calidad de los resultados (Lencinas & Díaz, 2011).
Los errores aleatorios tienden a cancelarse parcialmente realizando una serie de mediciones, y obteniendo el promedio de los valores medidos. En algunos casos se sabe que las mediciones no tienen igual precisión, con lo cual es necesario realizar un promedio ponderado a partir de un número (n_o) de observaciones de altura (z_i), ver Ec. (11).

$$\hat{z}=\frac{\sum_{i=1}^{n_o} z_i.w_i}{\sum_{i=1}^{n_o} w_i} \tag{11}$$

Donde z_i es el promedio ponderado de las observaciones, y w_i es el peso de cada observación, que es igual a la inversa del cuadrado de la dispersión de elevación (σ_z), esto es $w_i=\frac{1}{\sigma_z{}^2}$. Con el promedio ponderado (o pesado) de las z_i, las observaciones con mayor error (o sea, mayor dispersión) reciben menor peso (Maronna, 1995).

METODOLOGÍA

La presente propuesta apuntó a diseñar, desarrollar e implementar una metodología (ágil y de bajo costo) para la elaboración de mapas de cotas del terreno (MDE) en zonas de difícil acceso, a partir de la aplicación de la técnica Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, *Interferometry Synthetic Aperture Radar*), y sin contar con puntos de apoyo. El área de estudio correspondió a la región que incluye al Edificio Volcánico Lanín y su entorno, que presenta relieves variables y distintas coberturas terrestres. Se utilizaron datos SAR de las misiones ALOS Palsar (Banda L), Sentinel-1 (Banda C) y COSMO SkyMed (Banda X) para generar una variedad de productos interferométricos que condujeron a la obtención de los modelos de elevaciones. Posteriormente, los productos

obtenidos fueron analizados exhaustivamente respecto a fuentes oficiales de información geoespacial proveniente del Instituto Geográfico Nacional[1] (IGN). En la Tabla I se presenta un bosquejo de los datos SAR utilizados.

Tabla I
Imágenes para el área de Interés

Sensor	Banda	Modo	Órbita	Escenas
ALOS Palsar	L	FBS	Ascendente	5
			Descendente	0
Sentinel-1 A	C	IW	Ascendente	4
			Descendente	4
COSMO SkyMed 1 y 4	X	SH	Ascendente	4
			Descendente	0

La cadena de procesamiento para la obtención de MDE mediante imágenes SAR requiere de la disponibilidad de otros modelos de elevaciones externos con mediana precisión. En este caso se dispuso del SRTM (Banda C)[2], 30m de resolución espacial. Por otro lado, los datos de referencia para poder llevar a cabo un control y validación de los productos generados fueron datos altimétricos del MDE-Ar v2.0 30m (IGN, 2019).
La cadena de procesamiento se conformó por las siguientes etapas: selección de imágenes; preprocesamiento; corregistro, muestreo e interpolación; formación del interferograma; filtrado; desenrollado de fase; conversión de fase a altura y georreferenciación.
La metodología aplicada en el presente trabajo, incluye procesos de lectura, cálculos interferométricos, análisis y mapeo, de los diferentes productos satelitales. Éstos fueron llevados a cabo mediante la utilización de entornos de procesamiento InSAR (SNAP 7.0, SNAPHU), sistemas de información geográfica (QGIS) y programación SIG.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generaron un total de 19 MDE a partir de la técnica InSAR, donde, 12 de ellos fueron elaborados a partir de pares de imágenes SAR Sentinel-1 (6 ascendentes y 6 descendentes), y 6 a partir de pares de imágenes COSMO SkyMed. Para los pares de imágenes de ALOS-Palsar solo se pudo obtener un único MDE, esto se debió a que la coherencia obtenida en el resto de los pares interferométricos era muy baja, por lo que no fueron utilizados para la generación de MDE.
Los MDE obtenidos fueron corregidos a partir de una interpolación, mediante la cual se asignaron valores a los píxeles vacíos, y por la aplicación del desplazamiento rígido en *z*, ver Ec. (7). Luego, se generó un promedio ponderado de los valores de las alturas de las celdas para cada banda. El análisis de calidad se basó principalmente en los estadísticos *ECM*, *EM* y S_{δ_z}, para todos los MDE, y sumado a estos se obtuvieron los mapas de desvíos para los MDE ponderados.

[1] https://www.ign.gob.ar
[2] https://www2.jpl.nasa.gov/srtm

MDE INSAR

El error cuadrático medio para cada MDE fue analizado respecto al MDE-Ar, obteniendo que el MDE generado a partir de imágenes ALOS-Palsar tuvo un *ECM* de 31,49m. El *ECM* de los MDE generados a partir de imágenes Sentinel-1 rondó en los 72,84m. El *ECM* de los MDE generados a partir de imágenes COSMO SkyMed rondó en los 39,99m. Con los datos obtenidos se generó una gráfica, ver Fig. 1.

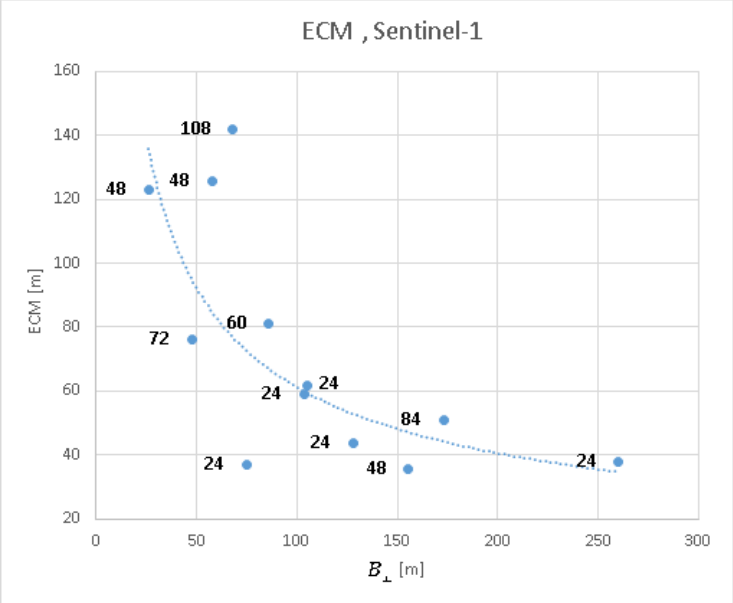


Figura 1. Influencia de $B_\perp$ y *BT* en el *ECM*, Sentinel-1.

Con los datos obtenidos se generó una gráfica, ver Fig. 2.

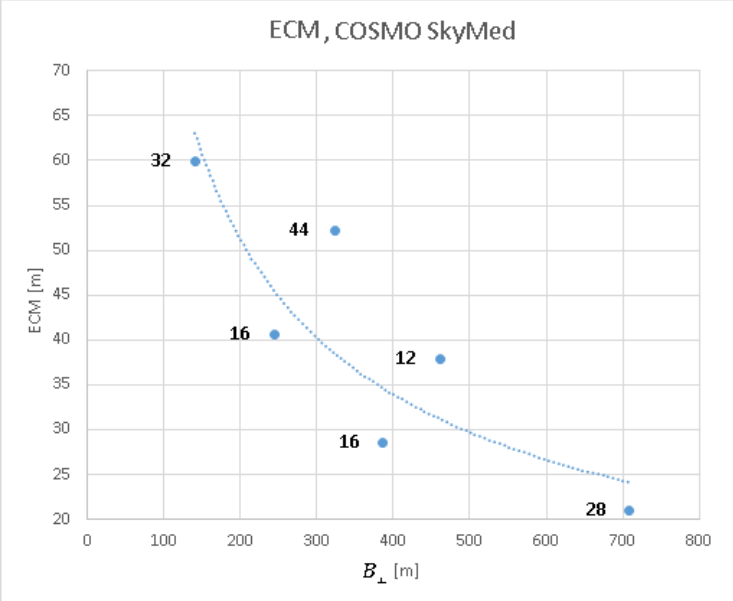


Figura 2. Influencia de $B_\perp$ y *BT* en el *ECM*, COSMO SkyMed.

En las imágenes, ver Fig. 1 y Fig. 2, se presentan los *ECM* en el eje vertical, y sus respectivas líneas base perpendiculares ($B_\perp$) en el eje horizontal y línea base temporal (*BT*) [días] referenciada al punto, para los MDE Sentinel-1 y COSMO SkyMed, respectivamente. Además, se generó una línea de tendencia de tipo potencial, dado que

es la que mejor se ajusta a los datos. Como se puede observar, a medida que la línea base perpendicular aumenta el *ECM* disminuye, esto se debe a que una línea base perpendicular corta genera una altura de ambigüedad grande, y por ende una mayor incertidumbre en la determinación de la cota. Por otro lado, en gran parte de los casos cuando la línea base temporal es mayor, el *ECM* se ubica por encima de la línea de tendencia, y viceversa. Esto se debe a que al aumentar la línea base temporal la decorrelación también aumenta y esto produce un mayor grado de incertidumbre en la determinación de la cota.

Analizando el desvío estándar y el error medio para los MDE generados, respecto al MDE-Ar, se obtuvo que el MDE generado a partir de imágenes ALOS-Palsar tuvo un S_{δ_z} de 31,41m y un *EM* de 2,29m. El S_{δ_z} de los MDE generados a partir de imágenes Sentinel-1 rondó en los 72,22m, y el *EM* rondó en 7,69m. El S_{δ_z} de los MDE generados a partir de imágenes COSMO SkyMed rondó en los 37,32m, y el *EM* rondo en 12,87m. Estos resultados son compatibles con los del *ECM*, llevando ambos a las mismas conclusiones.

MDE PONDERADOS

El error cuadrático medio, el error medio, y el desvió estándar del MDE generado a partir de imágenes ALOS-Palsar y los MDE ponderados generados a partir de imágenes Sentinel-1 y COSMO SkyMed se calcularon para toda la muestra, y además para los puntos con coherencia promedio baja ($0 \leq$ Coherencia < 0.5), media ($0.5 \leq$ Coherencia < 0.7) y alta ($0.7 \leq$ Coherencia ≤ 1), respecto a MDE-Ar 2.0. En la Tabla II se encuentran los resultados del análisis estadístico de los MDE ponderados.

Tabla II

ECM, *EM* y S_{δ_z} para los MDE ponderados generados. Estos estadísticos se presentan para toda la muestra (Todos), para puntos con coherencia baja (CB), para puntos con coherencia media (CM) y para puntos con coherencia alta (CA).

Puntos	Estadísticos	ALOS-Palsar	Sentine-1 A	COSMO SkyMed
Todos	ECM [m]	31,49	27,90	19,58
	EM [m]	2,29	-1,21	-0,95
	S_{δ_z} [m]	31,41	27,87	19,56
CB	ECM [m]	38,29	31,40	21,01
	EM [m]	6,99	-3,31	-1,42
	S_{δ_z} [m]	37,65	31,23	20,96
CM	ECM [m]	24,78	25,39	12,68
	EM [m]	-3,05	1,16	0,83
	S_{δ_z} [m]	24,59	25,36	12,66
CA	ECM [m]	28,25	13,35	8,98
	EM [m]	8,58	-2,89	1,67
	S_{δ_z} [m]	26,92	13,03	8,82

Pasando los valores del *ECM* de la Tabla II a una gráfica, ver Fig. 3, se pueden apreciar las variaciones de los mismos respecto a la coherencia.

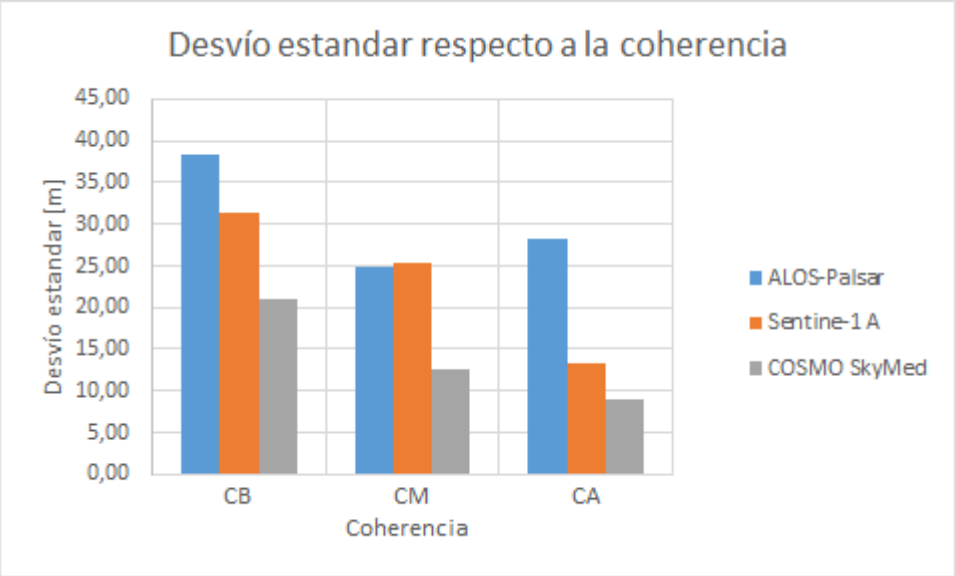


Figura 3. *ECM* de los MDE promedio respecto a la coherencia.

Tanto para Sentinel-1 como para COSMO SkyMed se puede observar, ver Fig. 3, que el *ECM* mejora notablemente con el aumento de la coherencia, siendo este estadístico, para los puntos con coherencia alta, dos veces más bajo que para los puntos con coherencia baja. En el caso de ALOS-Palsar se observa una mejoría de menos de dos veces del *ECM*, comparando los resultados para puntos con coherencia baja con los que tienen coherencia alta, sin embargo, se puede observar que los puntos con coherencia media tienen un *ECM* levemente menor que los puntos con coherencia alta (el desvío estándar se comporta de manera similar, ver Tabla II).

Por otro lado, en la Tabla II se puede observar que, tanto para Sentinel-1 como para COSMO SkyMed los *EM* para las distintas coherencias son relativamente iguales, respecto a la magnitud del *ECM*. Lo mismo no ocurre para ALOS-Palsar, pero esto se debe a que no se realizó un promedio ponderado con varios MDE para dicha banda.

Además, se analizó uno de los MDE generados a partir de imágenes COSMO SkyMed (designado como: 06012017-07022017) respecto al MDE promedio de la misma banda, dado que ambos tienen un *ECM* similar (20,96 y 19,58 respectivamente). Se encontró que existe un mejoramiento de los resultados por parte del promedio ponderado, dado que este tiene un 20,1% del MDE con coherencia alta o media en comparación con "06012017-07022017" que solo posee el 12,0%. Además, para esos puntos, el *ECM* del MDE promedio es de 12,30 metros, mientras que para "06012017-07022017" es de 14,88 metros.

MAPA DE DESVÍOS

Para poder apreciar visualmente la bondad de los productos obtenidos se realizaron mapas de desvíos, ver Fig. 4, los cuales manifiestan las diferencias de cotas entre los MDE generados a partir de imágenes ALOS-Palsar (a.), Sentinel-1 (b.) y COSMO SkyMed (c.), y el MDE-Ar 2.0. Los mismos se encuentran remuestreados en el sistema de coordenadas geográficas WGS84.

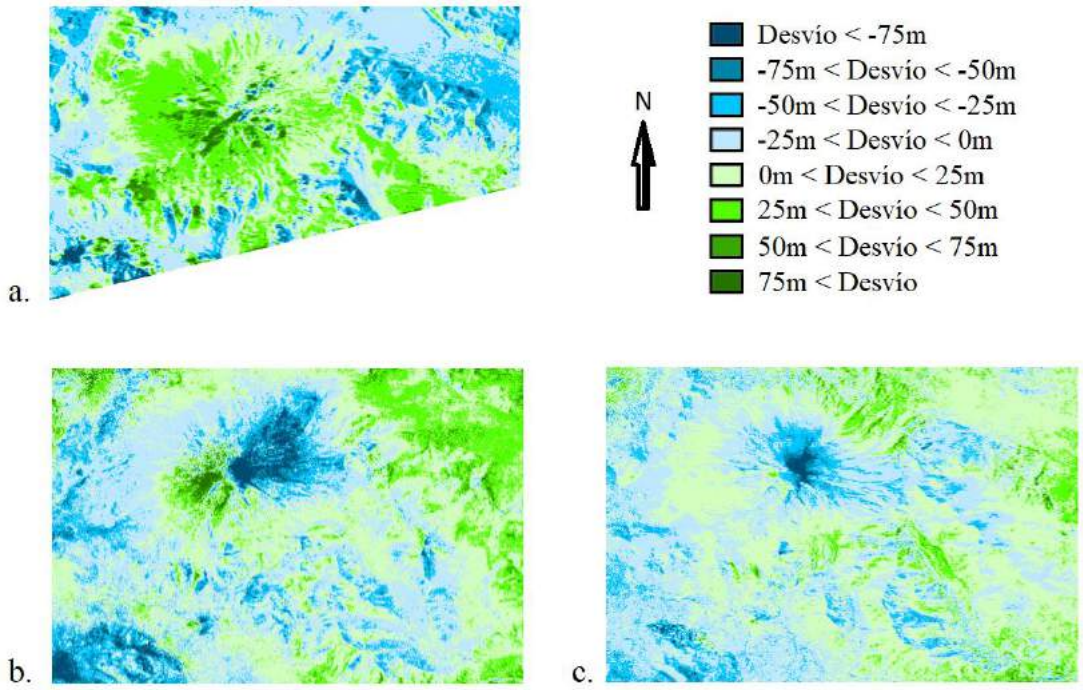


Figura 4. Mapas de desvíos.

Los mapas de desvíos fueron analizados pudiéndose observar que, ver Fig. 4, el MDE generado a partir de imágenes ALOS-Palsar (a.) tiene desvíos de pequeña magnitud en una parte del cono volcánico (sector Noreste) y en la base del mismo, desvíos de mediana magnitud para el resto del cono volcánico, y desvíos de gran magnitud para la cima del volcán y algunas laderas (sector este). Para el caso del MDE generado a partir de imágenes Sentinel-1 (b.), tiene desvíos de pequeña magnitud en todo el cono volcánico (excepto sector Noreste) y en algunas laderas (sector Norte y Sureste), desvíos de mediana magnitud en algunas laderas (sector Noreste), y desvíos de gran magnitud en algunas laderas (sector Suroeste) como en la cima del volcán y el parte del cono volcánico (sector Noreste). Para el caso del MDE generado a partir de imágenes COSMO SkyMed (c.), tiene desvíos de pequeña magnitud en el cono volcánico y algunas laderas (sector Noreste, Noroeste y Sureste), desvíos de mediana magnitud en algunas laderas (sector Norte y Suroeste), y desvíos de gran magnitud en la cima del volcán. Se puede apreciar entonces las bondades de COSMO SkyMed en relación a la calidad respecto a ALOS-Palsar y Sentinel-1.

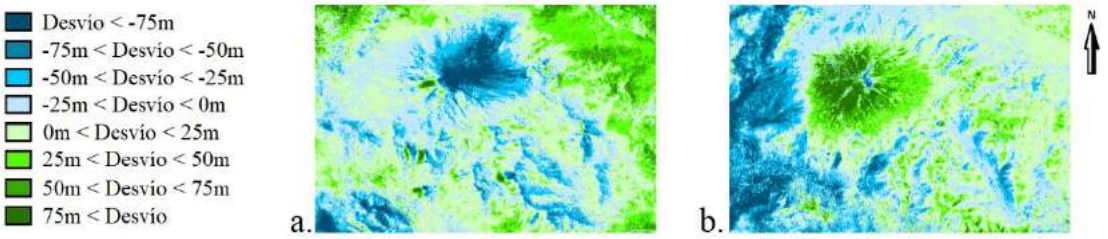


Figura 5. Mapa de desvíos ascendente y descendente, Sentinel-1.

Por otro lado, se puede apreciar como la calidad está relacionada a la toma, ver Fig. 5. Cuando la toma es ascendente, (mirada hacia el Este) se obtienen desvíos menores en la parte Oeste del área de estudio (a.), y cuando la toma es descendente, (mirada hacia el

Oeste) se obtienen desvíos menores en la parte Este (b.). Es por esto que se recomienda realizar un promedio ponderado con imágenes ascendentes y descendentes.

CONCLUSIONES

Los valores altimétricos de mayor calidad, para la realización de MDE, pudieron obtenerse en las zonas que presentaron franjas interferométricas, donde la coherencia fue de media a alta. Es por esto que se aconseja utilizar pares de imágenes cuyas líneas base temporales sean lo más pequeñas posibles con tal de lograr la menor decorrelación. En caso de no ser posible, es preferente usar pares de imágenes cuyas fechas de toma estén dentro de la misma temporada para que no ocurra pérdida de coherencia por causa de gradientes de temperatura y humedad elevados, que favorecen diferencias en las condiciones ambientales y composición de cobertura. Además, la bondad de los resultados estuvo ligada la altura de ambigüedad, donde valores altos para este parámetro perjudicaron la calidad de los MDE obtenidos (casos MDE para Sentinel-1). Es por esto que las líneas base perpendiculares deberán ser lo suficientemente largas para disminuir el valor de la altura de ambigüedad y así mejorar la calidad de los resultados, pero con valores alejados de los críticos determinados para cada banda.

La experiencia abordada en el presente trabajo permitió concluir que los interferogramas generados a partir de las imágenes en las bandas L y C presentan mayores áreas de coherencia media y alta que los obtenidos a partir de banda X. Esto se debe especialmente a la interacción entre la señal SAR y la cubierta terrestre, dado que las longitudes de onda más grandes logran mayor interacción, por lo que la banda X es la más afectada por los cambios temporales producidos en la cobertura de la tierra. Sin embargo, los sensores COSMO SkyMed y ALOS-Palsar presentan bondades respecto a Sentinel-1, en cuanto a la calidad de los MDE generados. Esto se debe a valores elevados del parámetro altura de ambigüedad que poseen los productos obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1, y que derivan en menor sensibilidad en la determinación de la cota.

El uso de banda X para superficies descubiertas, y banda L y banda C para zonas con cobertura vegetal densa, es el más propicio. Es aconsejable que, para la construcción de MDE, se utilicen imágenes COSMO SkyMed y ALOS-Palsar, las cuales aseguran mayor calidad en los resultados que Sentinel-1, debido a que los pares interferométricos generados a partir de este último poseen valores elevados del parámetro altura de ambigüedad, lo que deriva en una baja sensibilidad a la determinación de la altura. Además, se recomienda realizar un MDE ponderado a partir de varios MDE, y el uso de imágenes ascendentes y descendentes para mejorar la calidad de los mismos.

Los problemas de coherencia que presento ALOS-Palsar, en la mayoría de los pares, perjudicó a la elaboración de un MDE ponderado. En primera instancia, se hipotetizan posibles errores en los datos de los productos satelitales. Es por ello que esta problemática quedará para futuras investigaciones.

La metodología llevada a cabo cumplió con el objetivo planteado, la misma permitió obtener MDE en poco tiempo, a bajo costo y sin contar con puntos de apoyo. Estos fueron analizados con respecto al modelo digital de elevaciones oficial MDE-Ar, cuya resolución espacial es de 30m (tres veces lo obtenido con las imágenes SAR), y cuenta con un error medio (*EM*) de -2,13m y un desvío estándar (S_{δ_z}) de 1,91m (estimadores acordes, respecto a los calculados para los MDE InSAR, que permitieron considerarlo como modelo de referencia). Se pudo determinar que los MDE ponderados poseen una exactitud altimétrica (dado por el estadístico *ECM*) que ronda desde 28m para ALOS-Palsar, desde 13m para Sentinel-1 y desde 9m para COSMO SkyMed (aumentando a medida que

disminuye la coherencia). La precisión horizontal absoluta (90%) es menor a ±20m dado el uso de un MDE externo (SRTM) para la cadena de procesamiento interferométrico. Los MDE obtenidos poseen una resolución de 10m, se encuentran en el sistema de referencia geodésico POSGAR07, y las cotas se encuentran referenciadas al SRVN16. Estas características permiten su utilización en aquellos trabajos que se encuentran emplazados en el territorio nacional. Sin embargo, las precisiones de los resultados finales en la elevación del terreno no alcanzan para lograr el nivel de calidad del modelo oficial MDE-Ar. Se recomienda para futuras investigaciones aplicar la metodología planteada en el presente trabajo, pero incorporando una adecuada cantidad y distribución de puntos de apoyo como fuente de información externa. Logrando resultados de mejor calidad, y contando con las resoluciones espaciales brindadas por la técnica InSAR (entre 5m y 20m), se podrían generar MDE más beneficiosos que los MDE libres y globales, disponibles.

REFERENCIAS

CONAE. (5-7 de 6 de 2019). Curso introductorio a las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Buenos Aires, Argentina.

Curlander, J. C. y McDonough, R. N. (1991). Synthetic Aperture Radar. Systems and Signal Processing: Wiley Series in Remote Sensing, Nueva York, John Wiley & Sons.

Euillades, P., & Vénere, M. (2003). Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería, 12.

European Space Agency (ESA), & European Space Research and Technology Centre (ESTEC). (2007). InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications, ESTEC.

Felicísimo, Á. M. (1994). Modelos digitales del terreno. Pentalfa Oviedo. Retrieved from http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf

Ferrero, V. O. (2004). Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno - Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico - Edición 0.95 Rev. 26 de enero de 2004.

Hanssen, R. F. (2010). Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

IGN. (2019). Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina versión 2.0. Obtenido de https://www.ign.gob.ar (Último acceso: 28/08/2020)

Lencinas, J. y Díaz, G. (2011): "Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM", GeoFocus (Artículos), nº11, p. 431-454. ISSN: 1578-5157

Maronna, R. A. (1995). Probabilidad y Estadística Elementales para Estudiantes de Ciencias. La Plata.

Oliver, C., & Quegan, S. (Eds.). (2004). Understanding synthetic aperture radar images. SciTech Publishing, Inc.

Schowengerdt, R. A. (2007). Remote sensing, models, and methods for image processing (3rd ed). Burlington, MA: Academic Press.

Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 950–959.

BALANCE HÍDRICO APLICANDO TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN DE CUENCAS FLUVIALES

Montealegre Medina F.A.[a] y Gaspari F.J.[b]

[a] *Becario Doctoral CICPBA - CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*
[b] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

En la última década, gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales en plataformas web, es posible estimar balances hídricos con diferentes variables espacio temporales en una cuenca hidrográfica, para el apoyo en la gestión sostenible de los recursos hídricos e inundaciones. El objetivo del trabajo es definir el balance hidrológico para la temporada húmeda del año 2017 de la subregión A1, al noroeste del Rio Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se evaluó entre los meses de enero y abril utilizando datos de precipitación obtenidos del sensor IMERG, evapotranspiración del sensor MODIS, datos de escorrentía y almacenamiento de agua superficial de los componentes del sistema GLDAS 2.2 (Global Land Data Assimilation System). En la región, en dicho período, se registraron emergencias de inundación, que se corroboraron por datos pluviales de estaciones meteorológicas. El análisis se realizó a nivel de microcuenca, debido a la variabilidad espacial de los datos. Los resultados alcanzados en el periodo expresaron que la subcuenca 5 indicó la menor precipitación (750 mm) y el centro de la subcuenca A1 manifestó 835 mm. El escurrimiento superficial satelital mostró el máximo en la microcuenca 1 (68 mm), mientras que, en el resto de la subcuenca, los valores se mantuvieron uniformes. La evapotranspiración fue máxima en la microcuenca 5 (275 mm). Se concluye que esta metodología con imágenes satelitales es óptima para la descripción del balance hídrico, en una zona de gran extensión, representando en forma fehaciente distribución de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

Palabras Clave: Análisis de eventos pluviales, Balance de agua, cuenca de llanura.

INTRODUCCIÓN

En la última década, gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales en plataformas web, es posible estimar balances hídricos con diferentes variables espacio temporales en una cuenca hidrográfica, para el apoyo en la gestión sostenible de los recursos hídricos e inundaciones.

Las observaciones espaciales tienen el potencial de mejorar significativamente nuestra comprensión de los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y su influencia en la variabilidad climática, geodinámica, socio-económica y generación de balances hidrológicos. Se puede obtener información sin precedentes a través de la combinación de observaciones superficiales con observaciones desde el espacio, las cuales ofrecen una

cobertura geográfica global, un buen muestreo espacio-temporal y un monitoreo continuo en el tiempo (Pereira et al., 2018).

El balance hidrológico es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua, en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo, es posible cuantificar la disponibilidad de humedad durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta. Además, con los resultados generados se pueden calcular índices agroclimáticos, que indiquen la disponibilidad regional de agua en el suelo en forma espacial y temporal según los valores utilizados en el cómputo (Fernández-Long et al., 2012). Es importante conocer que los factores principales que condicionan la actividad vegetativa son la humedad y la temperatura. Por debajo de unas condiciones determinadas de temperatura y de humedad se produce la limitación del desarrollo vegetativo de las plantas superiores, y por lo tanto se paraliza su actividad vegetativa (Cámara Artigas et al., 2012).

El almacenamiento de agua terrestre (TWS, Terrestrial Water Storage por su sigla en inglés) es el agua almacenada sobre y debajo de la superficie terrestre, que incluye nieve, hielo, humedad del suelo, agua subterránea y agua superficial (Tang et al., 2010). Los cambios en las anomalías de TWS derivados de las teleobservaciones del Sistema Satelital GRACE (https://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5882), representan una medida integrada verticalmente de las variaciones en la acumulación de agua expresada en centímetros, y constituyen el agua subterránea, la humedad del suelo, el agua superficial, la nieve y la biomasa.

Sin embargo, el TWS es controlado principalmente por la humedad del suelo y el agua subterránea (Ospina Montes, 2016), es decir mide cambios totales de la columna integrada de agua terrestre almacenada (TWS) desde el espacio. Estas en anomalías entre el TWS y cambios en agua almacenada determinados con modelos terrestres ayuda a desasociar los componentes e identificar áreas inundadas (Thomas et al, 2020).

En los últimos meses de 2016 en el norte bonaerense y pampeano, un nuevo ciclo húmedo provocó serios anegamientos e inundaciones (Dillon et al., 2017), que obligaron a las autoridades provinciales a declarar la emergencia agropecuaria en la región, la cual se extendió en los primeros meses de 2017. Estas acumulaciones de agua se pueden monitorear con teledetección y establecer sus cambios a escala espacio - temporal.

El objetivo del trabajo fue definir el balance hidrológico aplicando técnicas de teledetección para la temporada húmeda del año 2017 de la subregión A1, al noroeste del Rio Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

MÉTODOS

El área en estudio fue la subregión A1 de la cuenca del Río Salado en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (Gomez et

al., 2017; MOSP, 1999). La superficie que ocupa es de 17742.85 km^2, divididas en 5 subcuencas (ver Fig.1).

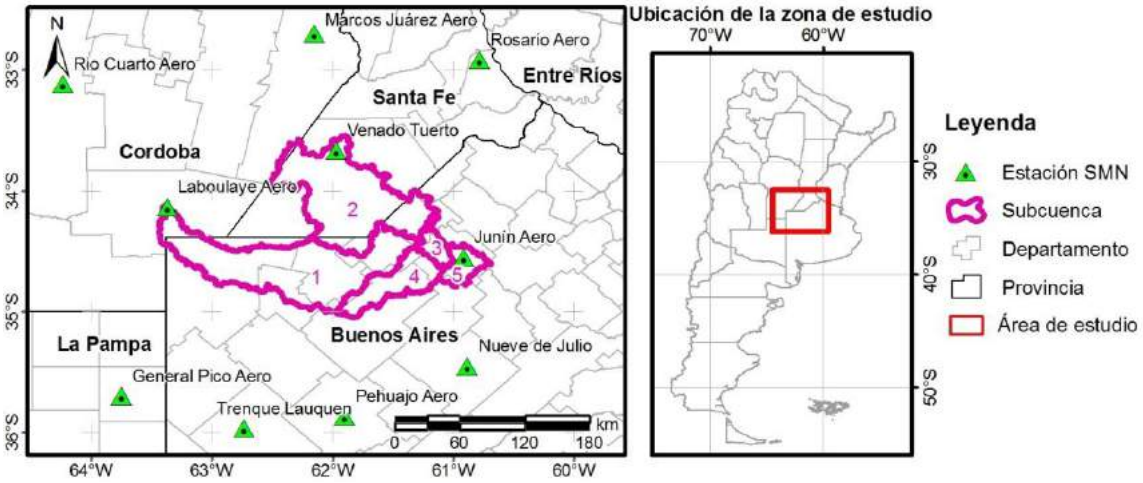


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio y estaciones meteorológicas analizadas.

Considerando las inundaciones de abril del año 2017 (Dillon et al., 2017) se solicitó al Servicio Meteorológico Nación (SMN) información pluvial mensual del año mencionado para el área de estudio. Las estaciones meteorológicas consultadas fueron: Gral. Pico Aero, Junín Aero, Laboulaye Aero, Marcos Juárez Aero, Nueve de Julio, Pehuajó Aero, Río Cuarto Aero, Rosario Aero, Trenque Lauquen y Venado Tuerto Aero. Este pedido se registró bajo el Expediente N°180.923 de Centro de Información Meteorológica (CIM). La ubicación de las estaciones se representa en la Fig. 1 y la Tabla I presenta los datos de lluvia mensual y anual de todas las estaciones, a escala regional y se identifica que las estaciones de Junín, Laboulaye y Venado Tuerto están dentro de los límites de la subregión A1.

Tabla I. Datos de precipitación del año 2017aportados por el SMN.

Estación / Mes	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**	**06**	**07**	**08**	**09**	**10**	**11**	**12**	**Anual (mm)**
Gral. Pico Aero	62.5	195.0	183.0	210.0	59.9	19.2	38.4	21.0	76.0	63.0	87.6	41.0	1056.6
Junín Aero	**148.9**	**54.0**	**94.9**	**359.0**	**98.8**	**12.2**	**29.5**	**71.0**	**138.2**	**104.7**	**29.4**	**68.0**	**1208.6**
Laboulaye Aero	**179.2**	**112.7**	**186.6**	**187.0**	**59.8**	**23.9**	**16.3**	**14.8**	**89.3**	**41.1**	**58.0**	**121.9**	**1090.6**
Marcos Juárez Aero	178.0	135.3	100.0	123.0	15.7	34.2	6.0	16.4	102.5	32.3	78.8	173.8	996.0
Nueve de Julio	78.1	90.6	126.2	203.0	61.5	32.8	29.1	89.9	133.3	95.4	38.6	30.6	1009.1
Pehuajó Aero	82.0	161.9	50.4	96.0	52.0	62.2	33.4	52.2	94.0	56.4	56.0	53.2	849.7
Río Cuarto Aero	91.5	63.9	61.4	56.7	6.8	15.2	8.0	6.1	16.0	22.5	72.2	140.6	560.9
Rosario Aero	200.1	106.2	151.8	124.3	52.9	23.6	41.2	38.7	173.1	39.8	50.3	115.7	1117.7
Trenque Lauquen	69.0	3.0	126.5	155.5	34.2	32.0	42.0	44.0	117.0	61.0	115.0	36.5	835.7
Venado Tuerto Aero	**158.0**	**100.5**	**145.8**	**195.0**	**99.7**	**19.1**	**19.0**	**38.3**	**107.0**	**63.0**	**40.5**	**190.7**	**1176.6**
Promedio (mm)	***124.7***	***102.3***	***122.7***	***171.0***	***54.1***	***27.4***	***26.3***	***39.2***	***104.6***	***57.9***	***62.6***	***97.2***	9901.5

En la Tabla I se visualizan los promedios pluviales mensuales que manifiestan al cuatrimestre húmedo desarrollado entre los meses de enero y abril. Este cuatrimestre ha sido analizado en el presente trabajo, debido a su importante participación en las inundaciones estudiadas.

El balance hídrico en la A1 se determinó con la aplicación del modelo HidroBio que es un modelo matemático autoejecutable elaborado por los Dres. Rafael Cámara Artigas y José Ramón Martínez Batlle, de la Universidad de Sevilla, España, dentro del programa Microsoft Excel, aplicando el método de Thornthwaite-Matter (ver Ec. 1) (Cámara Artigas et al., 2012).

La evaluación de la acumulación de agua para definir la inundación o zona anegada en la zona de estudio se implementó aplicando técnicas de teledetección, a partir del método de equilibrio hídrico empleando variables de flujo hidrológico provenientes de imágenes satelitales (ver Ec. 1).

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - R \qquad (1)$$

Donde ΔS / Δt representa el cambio en el almacenamiento de agua terrestre ΔS durante un período de tiempo determinado Δt; P es la precipitación mensual (mm / mes); E es la evapotranspiración (mm / mes) y R es el flujo de la corriente o escorrentía (Runoff en inglés), que incluye tanto el agua superficial como el subsuperficial.

En este trabajo, el intervalo de tiempo fue mensual y los valores de P, R y E se obtuvieron con productos de sensores satelitales (Tang et al., 2010). Las imágenes utilizadas poseen diferentes resoluciones espaciales y temporales, se buscó obtener productos de datos acumulados mensuales que abarquen por completo la subregión A1 de estudio.

El balance hídrico geoespacial se realizó aplicando técnicas de teledetección y herramientas de información geográfica, para la temporada húmeda (enero a abril) del año 2017 de la subregión A1. Para ello, se trabajó con los productos satelitales de:

- Programa Integrated Multi-satellite Retrievals para GPM (IMERG) versión 6, obtenidos de la plataforma Giovanni de la NASA, que provee información de **precipitación acumulada** (P) por mes en milímetros (Huffman et al., 2019);
- Respecto a la **evapotranspiración (E)**, se utilizaron los productos MODIS (MOD16A2) a bordo del satélite EOS-Terra (Earth Observation SystemTerra) (Running et al., 2017);
- La información de **escorrentía (R)** y **almacenamiento de agua terrestre** (**TWS)** se obtuvieron del Global Land Data Assimilation (GLDAS) versión 2.2 (Li et al., 2020).

RESULTADOS

Observando los datos meteorológicos del SMN se encontró que en la región alcanzo valores pluviales mayores a la media en el mes de abril, obteniendo un promedio de las estaciones analizadas de 171 mm, siendo los valores máximos en la subregión A1con 359 mm en Junín, 187 mm en Laboulaye y 195 mm en Venado Tuerto.

En la Tabla II se presenta el balance hídrico para las tres estaciones meteorológicas en la subregión A1, para el periodo húmedo, donde se visualizan los excesos hídricos producidos en el mes de abril. En dicho mes la evapotranspiración disminuye de forma considerable, generando un aumento de agua almacenada en el suelo y excedentes de humedad. Esta situación genera también un aumento en la dinámica de la escorrentía superficial.

Tabla II. **Balance hídrico de Thornthwaite-Matter por localidad.** *Fuente (Cámara Artigas et al., 2012)*

	Mes	T	P	ETP	P - ETP	ppa	ST	ΔST	ETR	Dh	S	R	DT	% S(P)
Junin	**Enero**	23.5	148.9	130.5	18.4	-83.0	85.4	18.4	130.5	0.0	0.0	6.4	85.5	4.3
	Febrero	23.5	54.0	122.8	-68.8	-151.8	53.0	-32.4	86.4	-36.4	0.0	3.2	53.0	5.9
	Marzo	20.6	94.9	89.3	5.6	0.0	58.6	5.6	89.3	0.0	0.0	1.6	58.6	1.7
	Abril	16.7	359.0	56.1	302.9	0.0	150.0	91.4	56.1	0.0	211.5	106.5	255.7	29.7
Laboulaye	**Enero**	24.6	179.2	141.0	38.2	-22.0	129.2	38.2	141.0	0.0	0.0	1.0	129.2	0.6
	Febrero	24.1	112.7	127.8	-15.1	-37.1	116.0	-13.2	125.9	-1.9	0.0	0.5	116.0	0.5
	Marzo	21.3	186.6	93.7	92.9	0.0	150.0	34.0	93.7	0.0	58.9	29.7	179.4	15.9
	Abril	17.3	187.0	58.4	128.6	0.0	150.0	0.0	58.4	0.0	128.6	79.2	214.3	42.3
Venado Tuerto	**Enero**	23.9	158.0	134.1	23.9	0.0	150.0	0.0	134.1	0.0	23.9	18.8	162.0	11.9
	Febrero	23.7	100.5	124.4	-23.9	-23.9	127.0	-23.0	123.5	-0.9	0.0	9.4	127.0	9.3
	Marzo	20.9	145.8	91.1	54.7	0.0	150.0	23.0	91.1	0.0	31.7	20.5	165.8	14.1
	Abril	17.2	195.0	58.5	136.5	0.0	150.0	0.0	58.5	0.0	136.5	78.5	218.3	40.3

Donde T: Temperatura media mensual en ºC; ETP: Evapotranspiración potencial en mm; P: Precipitación media mensual en mm; P-ETP: Pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo; ppa: Pérdidas potenciales acumuladas; ST: Agua almacenada en el suelo; ΔST: Cambios del agua almacenada en el suelo; ETR: Evapotranspiración real; S: Excedente de humedad; Dh: Déficit de humedad; R: Escorrentía total.

En la Fig. 2 se presentan los diagramas del balance hídrico corroborando los excesos de agua en toda la región para el periodo presentado en la Tabla II.

Luego de procesar la información según la temporalidad de cada producto satelital según dato (P – E – R), las imágenes satelitales de cada parámetro del balance hídrico se presentan de forma acumulada mensual en las figuras 3, 4, 5 y 6.

En la Fig. 3 se encontraron valores de P más altos en el mes de abril, coincidiendo con los datos del CIM, con valores superiores a los 300 mm en el centro de la A1, en especial en la subcuenca 3. Opuestamente, los valores más bajos de precipitación se presentaron en el mes de febrero.

La E fue reduciéndose desde enero a abril (ver Fig. 4) percibiendo los valores más bajos en el mes de abril, debido a la reducción de temperatura en la transición de verano a otoño. Los valores de temperaturas también fueron obtenidos por las estaciones del CIM y utilizados de igual forma en el balance hídrico del HidroBio como se muestra en la Tabla II.

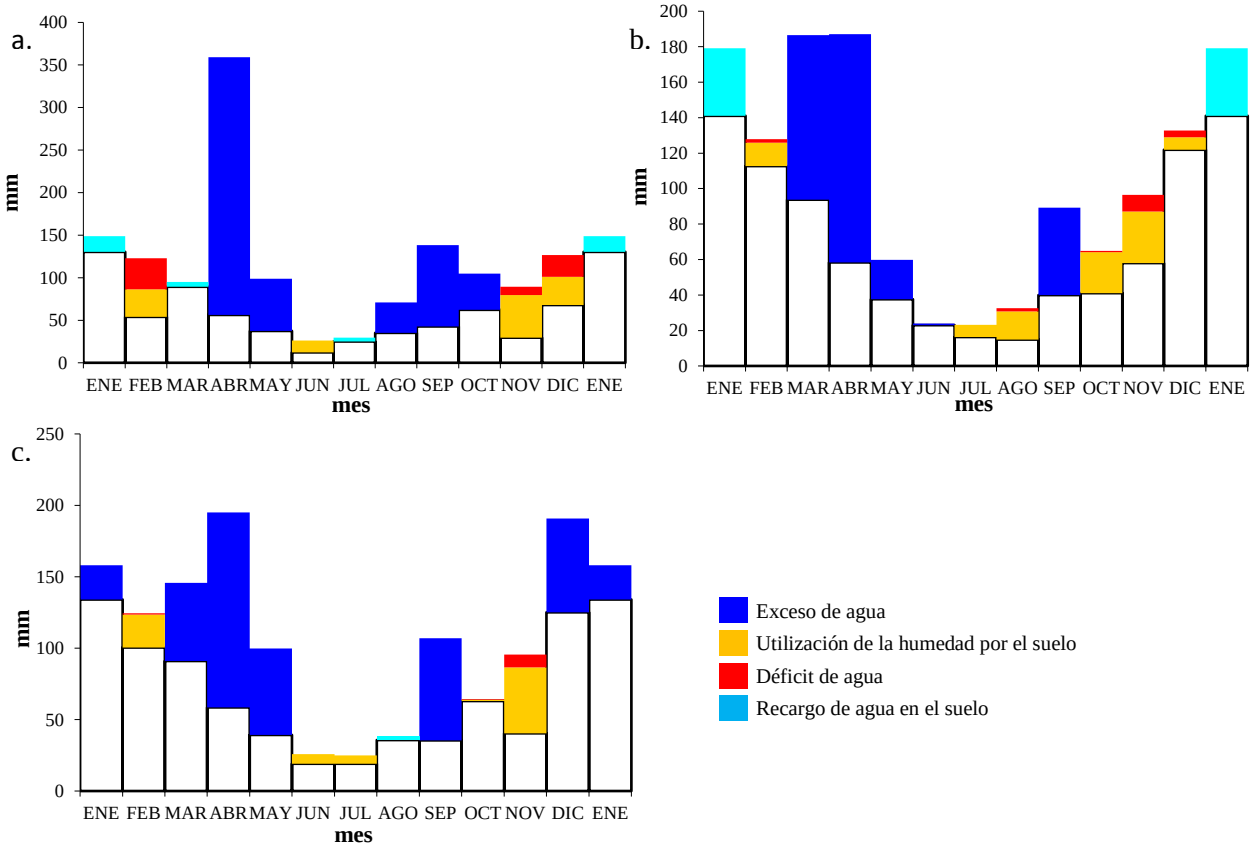


Figura 2. Diagrama de balance hídrico de Thornthwaite y Mather. Localidad: a. Junín; b. Laboulaye; c. Venado Tuerto. Fuente: Adaptación HidroBio (Cámara Artigas et al., 2012)

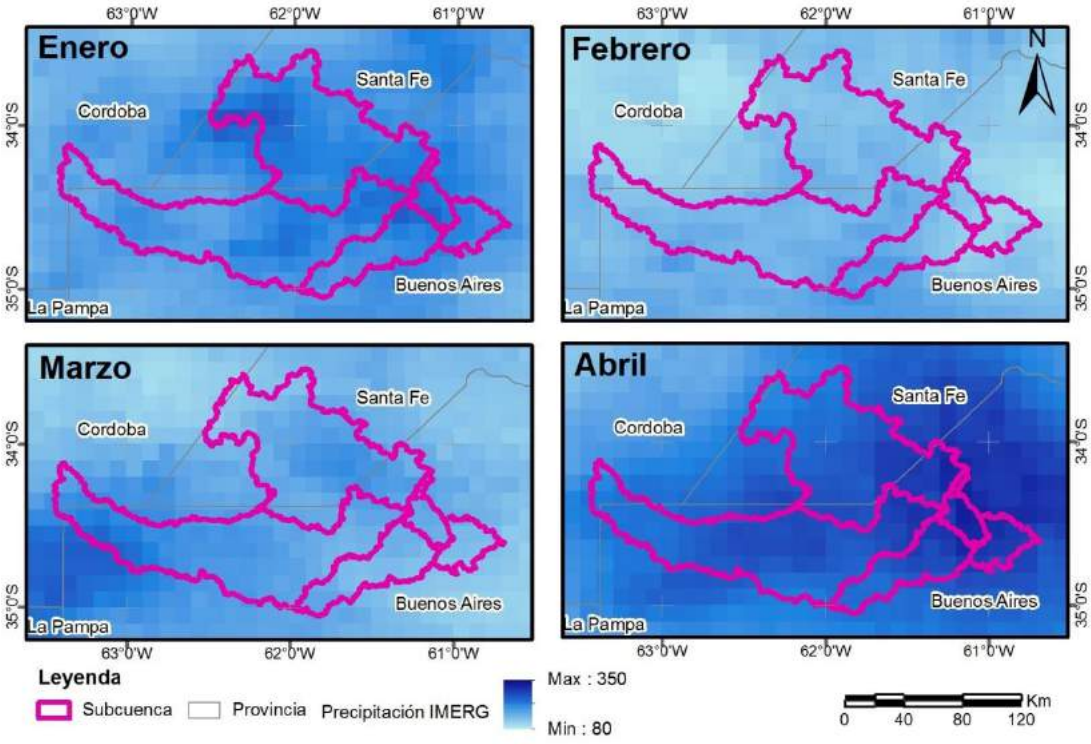


Figura 3. Precipitación acumulada mensual (mm).

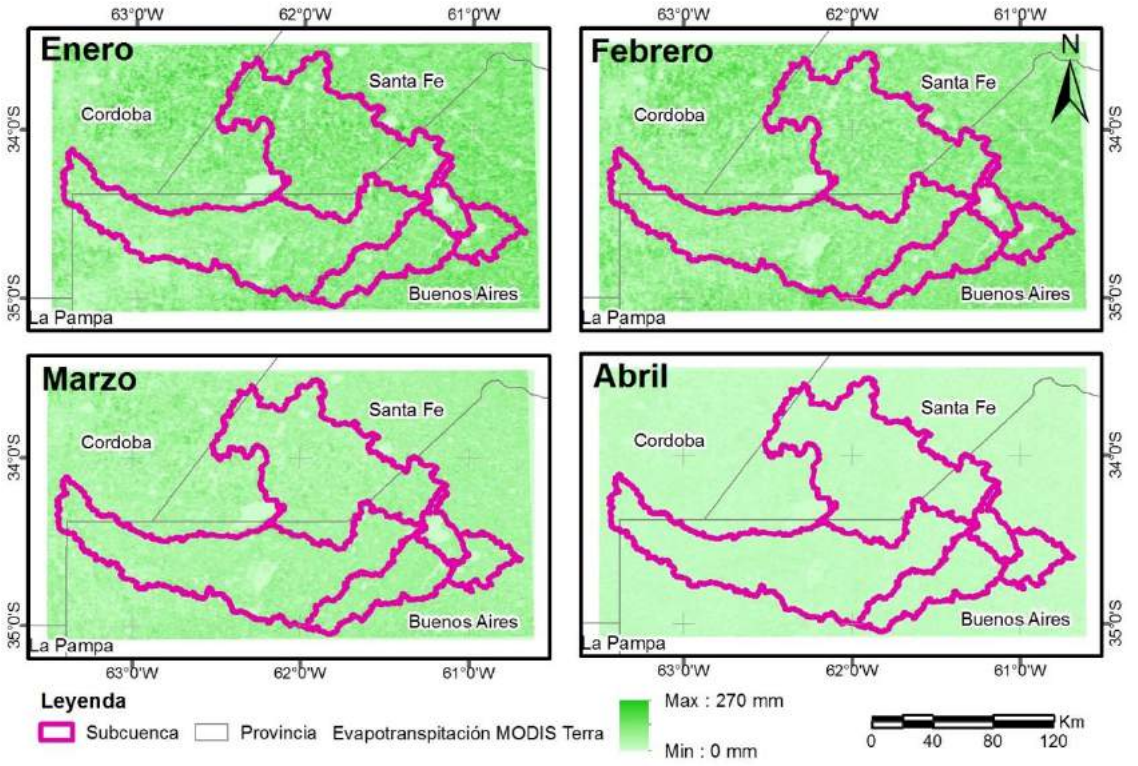


Figura 4. Evapotranspiración acumulada mensual (mm).

En la Fig. 5 se representa R detectada por el sistema GLDAS, que expresa valores mínimos en los meses de febrero y marzo hasta el inicio de las lluvias en abril.

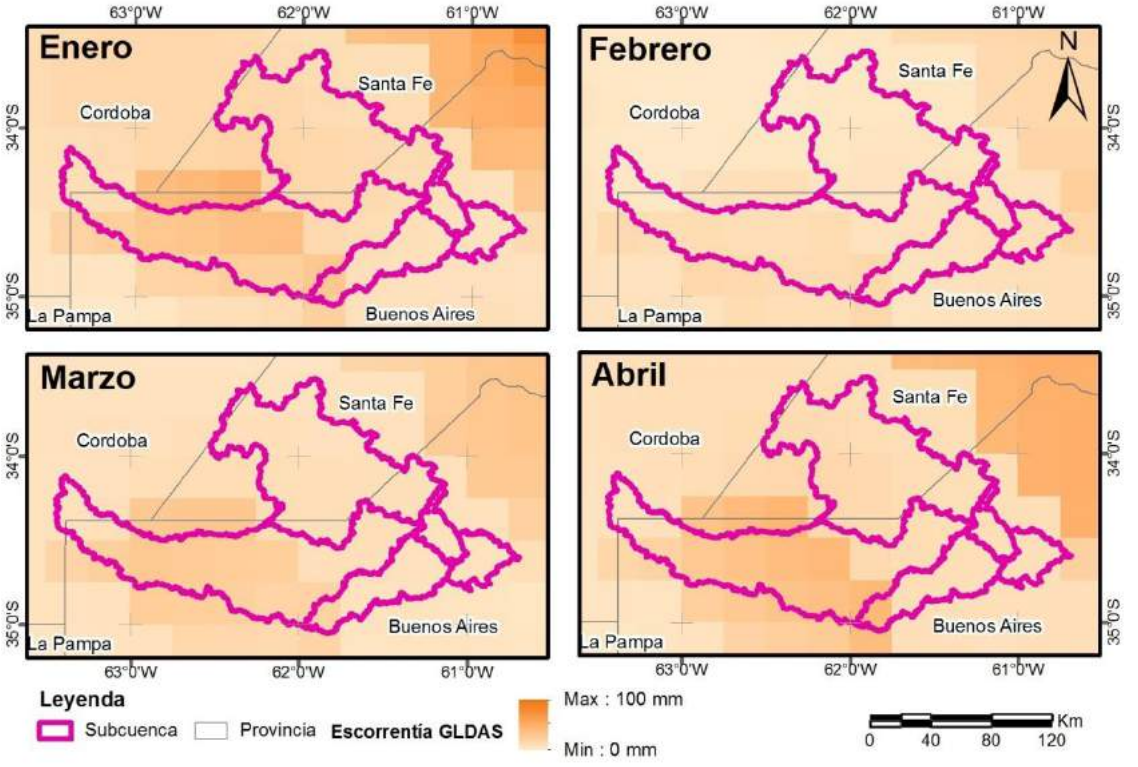


Figura 5. Escorrentía acumulada mensual (mm).

Los valores de TWS que expresan el almacenamiento de agua terrestre se calcularon por medio de la diferencia del día final e inicial de cada mes, obteniendo así la ganancia de agua en milímetros en cada periodo. En la Fig. 6 se visualiza la mayor ganancia hídrica en el mes de abril en la zona este de la subregión A1y las pérdidas en el primer bimestre.

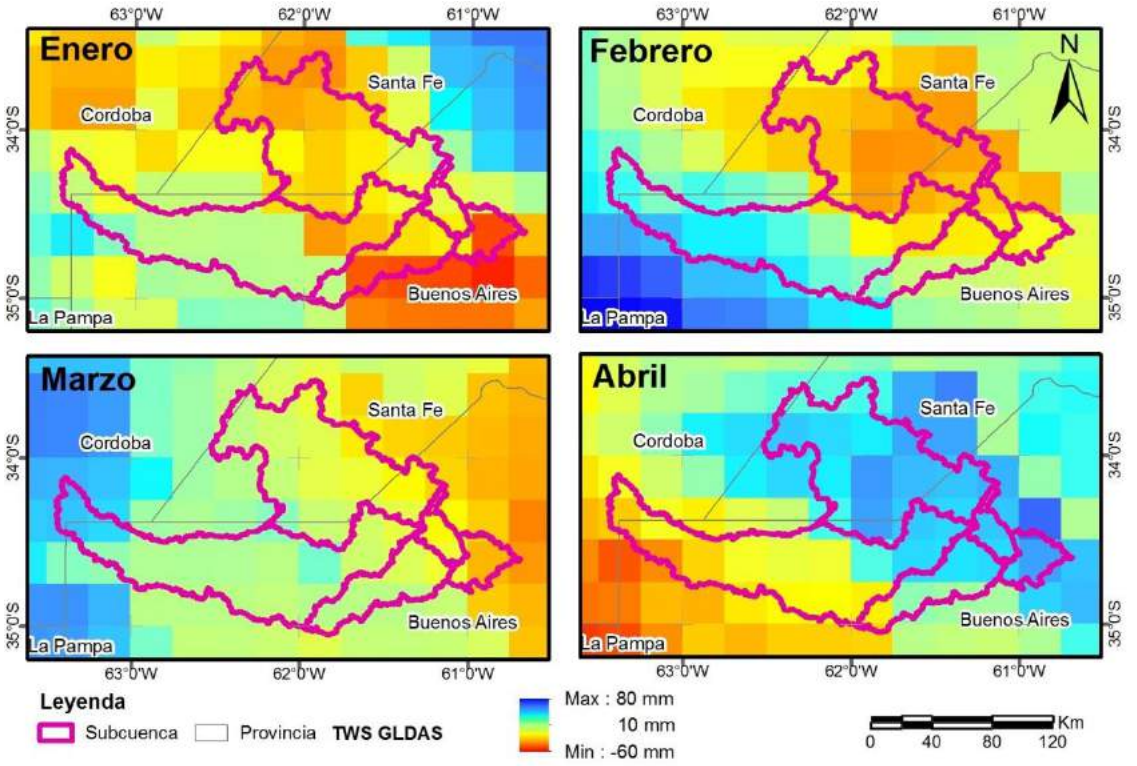


Figura 6. TWS mensual (mm).

Los resultados del análisis geoespacial logrados en el periodo húmedo de estudio, identificado como el primer cuatrimestre del año 2017, como se observa en la Tabla III y la Fig. 7, expresaron que la subcuenca 5 indicó la menor P acumulada (750 mm) y el centro de la subregión A1 manifestó 835 mm. La E fue máxima en la subcuenca 5 (275 mm). El R satelital mostró el máximo en la subcuenca 1 (68 mm), mientras que, en el resto de la subregión, los valores se mantuvieron uniformes. En relación con el TWS, se obtuvieron valores negativos, debido a que los tres primeros meses se generaron pérdidas, y aunque hubo una fuerte precipitación en abril, esta no fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas de todo el periodo considerado.

Tabla III. Valores medios de cada variable acumulada en el periodo húmedo por subcuenca.

Subcuenca	Area (km2)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	TWS (mm)	P-E-R
1	7583.6	785.2	223.4	68.1	-6.5	493.7
2	6766.1	769.2	257.6	38.0	-15.4	473.6
3	598.2	835.1	204.3	32.0	-11.8	598.8
4	1996.2	767.4	265.0	49.5	-14.1	452.9
5	798.7	750.0	274.2	31.1	-20.8	444.6

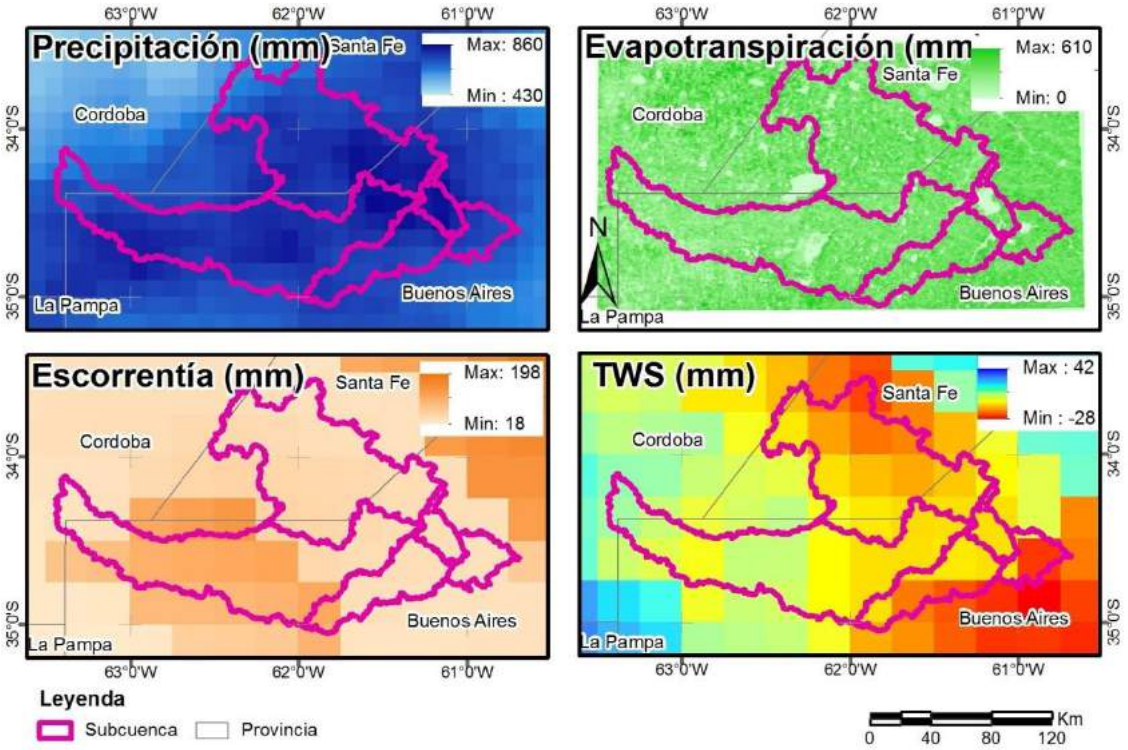


Figura 7. Datos acumulados (mm) de cada variable en el periodo húmedo (Enero a Abril).

En la Fig. 8 se representa el balance hídrico (P-E-R) a nivel geoespacial para el periodo estudiado, identificando la variabilidad de la disponibilidad hídrica representativa de áreas de llanura, obteniendo valores positivos entre el 59 y 72%, siendo el máximo en la subcuenca 3 y el mínimo en la 5.

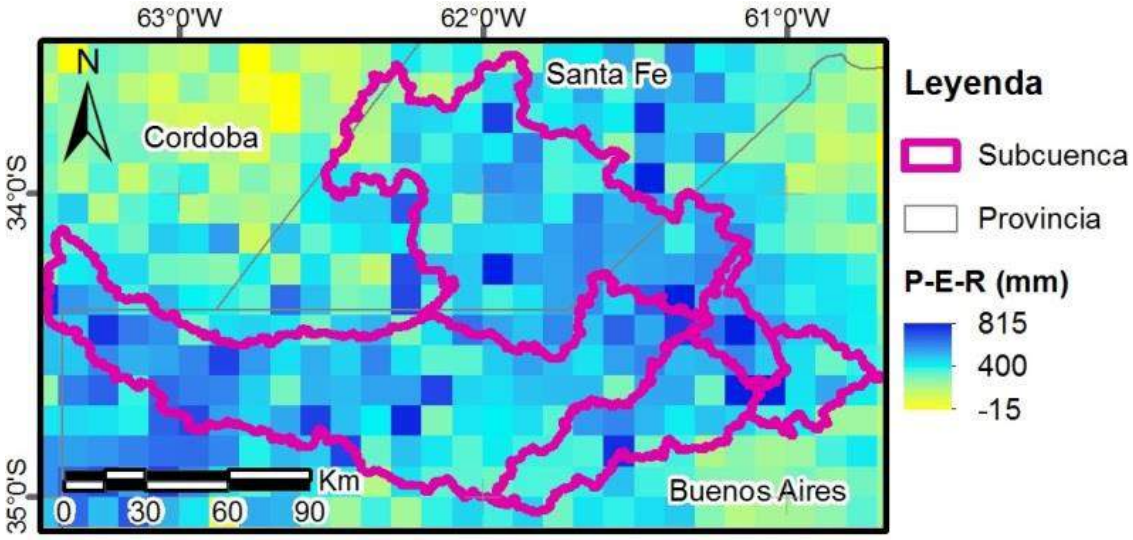


Figura 8. Resultado del balance hídrico P-E-R (mm).

En la Tabla IV se presenta el balance hídrico a nivel volumétrico (millones de metros cubico) definido por teledetección, reflejando la mayor ganancia en la subcuenca 1 debido a su extensa ocupación en la subregión A1, y en contraparte la subcuenca 3 al ser la más pequeña genera una menor ganancia hídrica superficial.

Tabla IV. Resultados por millones de metros cúbicos

Subcuenca	P	E	R	P-E-R
1	59549.5	16945.0	5164.1	37440.4
2	5204.8	1743.2	257.0	3204.6
3	499.6	122.2	19.2	358.2
4	1531.9	529.0	98.8	904.1
5	5990.2	2190.3	248.5	3551.4
Total	72775.9	21529.7	5787.5	45458.7

Los procedimientos aplicados contribuyeron en caracterizar los componentes hídricos de la zona de estudio, para observar el comportamiento mensual de la acumulación de agua superficial y en general del periodo húmedo del año 2017. Estos procesos otorgan un lineamiento de la diversidad espacial de las variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico, utilizando productos satelitales de acceso público, con diferentes resoluciones.

CONCLUSIONES

La utilización de productos de sensores satelitales, en zonas de gran extensión permite identificar espacialmente las variaciones temporales y anomalías en parámetros hídricos que intervienen en el balance hídrico y en la descripción de la acumulación de agua superficial terrestre. Los valores encontrados en los datos capturados en estaciones meteorológicas de la región se corresponden con los obtenidos en las imágenes satelitales, permitiendo de esta forma analizar diversos periodos y zonas en forma interactiva con información de acceso público, facilitando el entendimiento de la dinámica hídrica en la región, la cual puede influir directamente en emergencias de inundación en el futuro.

En la región en estudio, se observó una mayor presencia de agua en superficie localizada en las subcuencas bajas de la subregión A1. Sin embargo, en necesario caracterizar adecuadamente la zona de estudio, como por ejemplo cuerpos de agua presentes en la zona, que contribuyen el almacenamiento de agua en la superficie, ya que reflejan valores elevados en las imágenes satelitales, al igual que hay que tener en cuenta la resolución espacial de cada producto o sensor satelital.

Se concluye que esta metodología con imágenes satelitales es óptima para la descripción del balance hídrico, en una zona de gran extensión, representando en forma fehaciente distribución de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

AGRADECIMIENTOS

Grupo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo. Grupo de Investigación Cuaternario y Geomorfología, PAI RNM-273. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, España.

Proyecto "Sistema Soporte de las Decisiones frente a eventos extremos para la gestión de la Cuenca Alta del Río Salado de la Provincia de Buenos Aires. Estudio De Impacto Ambiental y Social (EIAyS)". Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Medio Ambiente y Cambio Climático (FONARSEC). MINCyT. Convocatoria 2013. Res. N° 348/13 de la ANPCyT. Res N° 572/14. Director: Dr. Pablo Bereciartua. Representante por la UNLP: Dra. Fernanda Gaspari. Periodo 2015 - 2020.

REFERENCIAS

Cámara Artigas R., Martínez Batlle J. R., Díaz del Olmo F. Metodología y aplicaciones de los balances hídrico y bioclimático y su aplicación al estudio ecodinámico de las formaciones vegetales. Grupo de trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo. Grupo PAI RNM-273. 21. https://www.geografiafisica.org/2012/09/17/plantilla-para-el-calculo-del-balance-hidrico-y-el-diagrama-bioclimatico/(2012).

Dawers, N. H., Anders, M. H. and Scholz, C. H. Growth of Normal Faults, Displacement-Length Scaling. *Geology* 21, 1107–1110 (1993).

Dillon, B., Pombo, D. G., Celeste, M., Uncal, M., Diharce, M. C., Escuredo, D. L., Palazzo, L., Pablo, J., & María, J. *La áreas inundadas y anegadas en el noreste de la provincia de La Pampa*. (2017).

Fernández-Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., & Murphy, G. M. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Agronomía & Ambiente*, *32*(1–2), 31–47. https://www.researchgate.net/publication/261088005. (2012).

Gomez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaria, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. Modelos digitales de elevación : correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, *29*(1), 39–51. http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf (2017).

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) Acceso 09/2020 (2019).

MOSP. *Plan Maestro Integral de la cuenca del río Salado*. http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/planmaestro.php (1999).

Li, B., H. Beaudoing, and M. Rodell, NASA/GSFC/HSL GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Acceso 09/2020 (2020).

Ospina Montes, D. L. *Análisis de la información proveniente del satélite GRACE para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: caso ejemplo provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales. 1*, 59. (2016).

Pereira, A., Cornero, C., Amherdt, S., & Pacino, M. C. Análisis Multitemporal Del Almacenamiento De Agua Continental En La Cuenca Del Plata Mediante Gravimetría Satelital. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. (2018).

Running, S., Mu, Q., Zhao, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-09-11 de https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006. Acceso 09/2020. (2017).

Tang, Q., Gao, H., Yeh, P., Oki, T., Su, F., & Lettenmaier, D. P. Dynamics of terrestrial water storage change from satellite and surface observations and modeling. *Journal of Hydrometeorology*, *11*(1), 156–170. https://doi.org/10.1175/2009JHM1152.1 (2010).

Thomas, B.; Famiglieti, J.; Reager, J.T.; Rodell, M. and Bolten, J. Sinopsis del Satélite GRACE y Sus Datos y Aplicaciones. ARSET Applied Remote Sensing Training. https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil/span_S5P1.pdf . Acceso (2020)

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS COEFICIENTES ESTÁTICOS DE TORQUE DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS

Montenegro S.O.[a,b,c], Nicoletti P.[b,c], Villanueva A.F.[b,c], Ganiele M.J.[a,b,c], Lingeri S.D.[c,d] , Quinteros L.[b], Ponzoni L.M.E.[b,c]

[a]*Universidad Nacional de San Martín, Instituto Sábato, ARGENTINA*
[b]*Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*
[c]*Laboratorio Perfil Alar, Centro Atómico Constituyentes, ARGENTINA*
[d]*Laboratorio de Análisis de Vibraciones y Extensometría, Centro Atómico Constituyentes, ARGENTINA*

e-mail: saraorismontenegro@gmail.com, lponzoni@untref.edu.ar

RESUMEN

El compromiso de nuestro país respecto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y nuevas normativas asociadas a las energías renovables, combinadas con el potencial eólico de Argentina, promovieron el desarrollo de las energías renovables en todas sus escalas. Hoy en día, respecto a la energía eólica, las tecnologías de baja potencia constituyen posibles soluciones a problemas de abastecimiento de energía eléctrica que enfrentan las zonas alejadas de las grandes urbes. Las turbinas eólicas de eje vertical son consideradas menos eficientes que las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal, por eso es relevante estudiar con detenimiento sus características aerodinámicas. En este trabajo, se investigaron numéricamente los coeficientes estáticos de torque de una turbina eólica Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000, utilizando SolidWorks Flow Simulation® y empleando modelos que fueron corroborados experimentalmente por Kamoji, Kedare y Prabhu. Los coeficientes estáticos de torque se hallaron mediante un método de cálculo, utilizando valores de presión obtenidos mediante CFD. Asimismo, en este trabajo se plantea que, mediante este método para hallar los coeficientes estáticos de torque, se puede encontrar la relación de superposición óptima de los álabes y evaluar la capacidad de arranque automático del aerogenerador.

Palabras clave: Energía eólica, Aerogenerador, Savonius, coeficientes estáticos de torque, CFD.

INTRODUCCIÓN

El compromiso de nuestro país respecto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y nuevas normativas asociadas a las energías renovables, combinadas con el potencial eólico de Argentina, promovieron el desarrollo de las energías renovables en todas sus escalas. Hoy en día, respecto a la energía eólica, las tecnologías de baja potencia constituyen posibles soluciones a problemas de abastecimiento de energía eléctrica que enfrentan las zonas alejadas de las grandes urbes.

Un aerogenerador Savonius es un dispositivo de eje vertical que opera esencialmente por las fuerzas de arrastre que genera el viento sobre sus álabes, sin embargo la fuerza de sustentación también contribuye -en menor medida- a la potencia mecánica transmitida al eje (Akwa et al, 2012). Cuando el viento golpea sus álabes, éstos experimentan fuerzas de arrastre debido a la diferencia de presión entre las superficies cóncavas y convexas (Sadrul

Islam et al, 1993). Numerosos investigadores (Sadrul Islam et al, 1993; Kamoji et al, 2008; Fujisawa N. & Gotoh, F., 1994; Fernando M.S.U.K., 1987; Fujisawa N., 1992; Fujisawa N. & Gotoh, F., 1992; Modi V. J. & Fernando M.S.U.K., 1989) estudiaron este fenómeno en túneles de viento, evaluando las presiones sobre los álabes con el objetivo de hallar distintos parámetros aerodinámicos de los Savonius.

Otra forma de estudiar los parámetros aerodinámicos de los Savonius es, a través de la aplicación de métodos numéricos que resuelven las ecuaciones de conservación del flujo (Akwa et al, 2012). Esto se realiza mediante el uso de distintos softwares. Algunos de ellos son, Ansys Fluent® (Amiri et al, 2019; Hassanzadeh et al, 2013; Nasef et al, 2013; D'Alessandro et al, 2010; Yaakob et al, 2012), SolidWorks Flow Simulation® (Yaakob et al, 2010; Yaakob et al, 2010; Chávez-Cano et al, 2019; Driss et al, 2015; Olaoye O. S. & Adeoye O., 2016), Star-CCM^{+}® (Akwa et al, 2012) y CFdesign® (Jaohindy et al, 2013; McTavish et al, 2012).

La capacidad de arranque automático, es una de las consideraciones importantes al evaluar el rendimiento de las aerogeneradores Savonius, ya que un Savonius con una excelente capacidad de arranque automático puede comenzar a girar a un número de Reynolds relativamente bajo. El arranque automático, implica que el dispositivo puede iniciar la rotación sin ninguna fuerza de activación adicional o externa (Zhao et al, 2019).

Para estudiar el rendimiento estático de los aerogeneradores Savonius, se puede adoptar un enfoque numérico. Para ello, el coeficiente estático de torque debe evaluarse en diferentes ángulos de rotor (θ), donde el ángulo del rotor se define como el ángulo entre el álabe de la turbina y la dirección del flujo de aire que se aproxima. El coeficiente estático de torque (C_θ), es el par ejercido sobre los álabes del dispositivo mientras que se mantiene estacionario. Los bajos coeficientes estáticos de torque (valores negativos o valores cercanos a cero) implican una capacidad de arranque automático muy pobre (Zhao et al, 2019), mientras que los coeficientes estáticos de torque positivos, indican que el rotor puede iniciar en esa posición angular (Menet J.-L. & De Rezende T., 2013).

En este trabajo, se presenta el diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical mediante SolidWorks Flow Simulation® para hallar los coeficientes estáticos de torque.

MÉTODOS

En el artículo de Kamoji et al, 2008 se obtienen experimentalmente los valores de presión en puntos a lo largo de la sección media de los álabes de varios Savonius con distintas configuraciones y bajo diferentes condiciones (relación de superposición, tipo de borde de los álabes, número de Reynolds), para encontrar los coeficientes estáticos de torque entre otros. Estos coeficientes se obtienen mediante un método de cálculo detallado en los artículos de Fujisawa N., 1992 y Fujisawa N. & Gotoh, F., 1992.

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, hallar los coeficientes estáticos de torque, se dibujó en Solidworks® uno de los modelos de Savonius ensayados en el artículo de Kamoji et al, 2008. Con este diseño (ver Fig. 1), se realizaron las simulaciones, se calcularon los coeficientes y se contrastaron los resultados con los obtenidos experimentalmente (Kamoji et al, 2008). En la tabla I, se definen los parámetros de diseño del modelo utilizado.

Tabla I. Parámetros de diseño del modelo utilizado (elaboración propia).

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro del rotor (D)	213,5	mm
Altura (H)	220	mm
Radio interior del alabe (R_{int})	52	mm
Radio exterior del alabe (R_{ext})	62,5	mm
Espesor del álabe (t)	10,5	mm
Distancia entre álabes (a)	15,5	mm
Relación de superposición $= \frac{a}{2(R_{ext}-t)}$	0,15	Adimensional
Relación de aspecto$= \frac{H}{D}$	1	Adimensional
Diámetro de Platos (D_0)= *1,1*D*	234,85	mm
Espesor del plato	10	mm

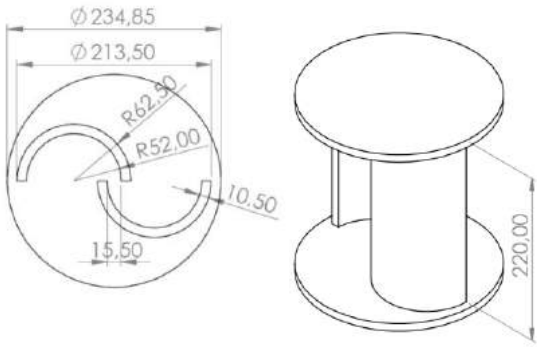


Figura 1. Savonius de álabes semicirculares con bordes planos y sin eje (elaboración propia).

Las simulaciones se realizaron mediante Flow Simulation®, donde se fijaron como objetivos 68 puntos de presión total promedio ubicados cada 10º ($10º<\Phi_{avance}<170º$, $190º<\Phi_{retroceso}<350º$) a lo largo de la sección media del dispositivo, es decir, 34 puntos por cada álabe. Se realizaron un total de 12 simulaciones, variando el ángulo de rotor cada 15º ($0º<\Theta<165º$). En la figura 2, se observa Φ_a, Φ_r y Θ; y en la figura 3, donde se colocaron los objetivos puntuales de presión de las simulaciones.

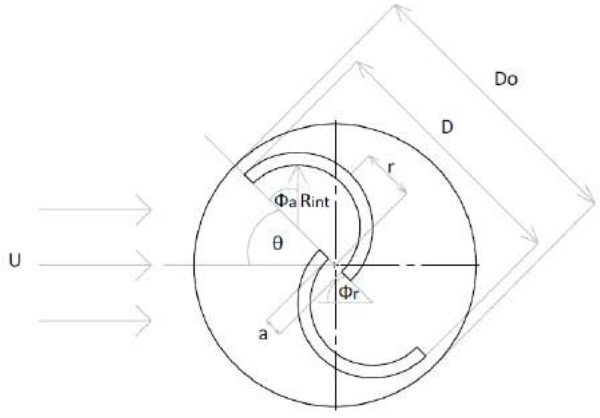


Figura 2. Savonius con álabes semicirculares (elaboración propia).

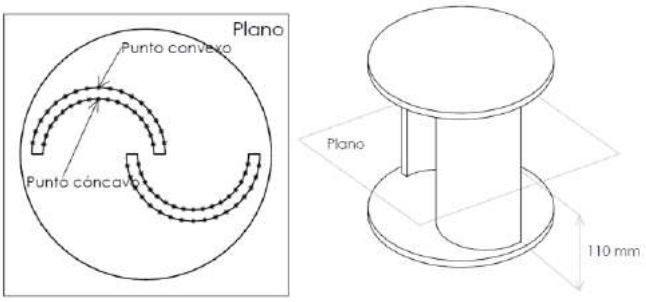


Figura 3. Objetivos dispuestos cada 10º a lo largo de la sección media (elaboración propia).

El análisis CFD se realizó de manera estática utilizando flujo externo, presión atmosférica (101325 Pa), 30ºC, número de Reynolds de 120000 (U= 8.98 m/s), y un dominio computacional en 3D (ver Fig. 4). El mallado rectangular, se refinó en la superficie de los álabes para obtener mejores resultados.

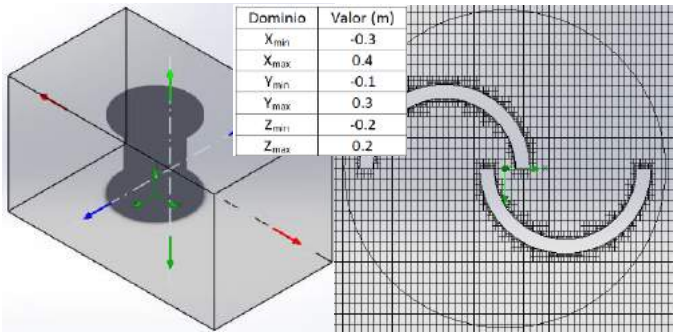


Figura 4. Dominio computacional y mallado (elaboración propia).

Los coeficientes estáticos de torque se hallaron utilizando el método de cálculo propuesto en los trabajos mencionados (Kamoji et al, 2008; Fujisawa N., 1992; Fujisawa N. & Gotoh, F., 1992), luego de realizar las simulaciones y obtener los valores de presión. Este método consiste en obtener valores experimentales de presión en puntos dispuestos a lo largo de la sección media del dispositivo, con los cuales se calculan coeficientes de presión (ver Ec. (1)). Los coeficientes de presión se emplean para encontrar los coeficientes locales estáticos de torque (ver Ec. (2)) que, posteriormente, son integrados con el objeto de hallar los coeficientes estáticos de torque (ver Ec. (3)). A continuación, se detallan el método y las condiciones de ensayo que se tomaron para realizar los cálculos de los coeficientes, número de Reynolds (ver Ec. (4)) y brazo de palanca.

Coeficiente de presión

$$C_{pr} = \frac{2(P-P\infty)}{\rho U^2} \quad (1)$$

Donde

- P = Presión en la superficie del álabe
- P∞ = Presión atmosférica (101325 Pa)
- ρ = Densidad del aire a 30° C (1.164 kg/m^3)
- U = Velocidad de corriente libre (8.98 m/s)

Coeficiente local estático de torque, calculado para cada ángulo del álabe, 10º<Φ_a<170º cada 10º para el álabe de avance, y entre 190º<Φ_r<350º cada 10º para el álabe de retroceso.

$$C_\Phi = \frac{R_{int}}{D^2}\, \Delta C_{pr}\, r\, sen\Phi \quad (2)$$

Coeficiente estático de torque, calculado para cada ángulo del rotor entre 0º<Θ<165º cada 15º**.**

$$C_\Theta = \frac{2R_{int}}{D^2}\left[\int_0 \Delta C_{pr}\, r\, sen\Phi_a\ d\Phi_a + \int_0 \Delta C_{pr}\, r\, sen\Phi_r\ d\Phi_r\right] \quad (3)$$

Donde

- r= Brazo de palanca
- R_{int}=Radio interior del álabe (52 mm)
- D=Diámetro del rotor(213,5 mm)
- $\Delta C_{pr}=C_{pr\ cóncavo} - C_{pr\ convexo}$
- Φ_a=Ángulo de álabe de avance
- Φ_r=Ángulo de álabe de retroceso

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4)$$

Donde

- Re=Numero de Reynolds (120 000)
- D= Diámetro del rotor (213.5 mm)
- ρ = Densidad del aire a 30° C (1,164 kg/m^3)
- U = Velocidad de corriente libre (8.98 m/s)
- μ= Viscosidad dinámica a 30ºC (1,86.10^{-5} N s/m^2)

Brazo de palanca

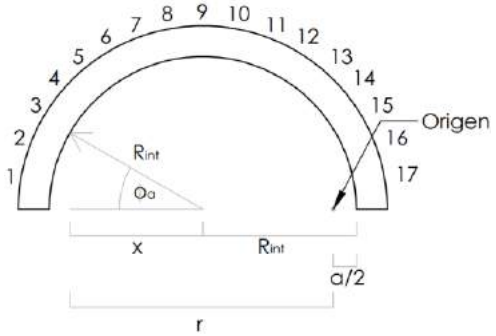
Este valor, se determina como la proyección sobre el eje x del punto de aplicación de la fuerza (objetivo puntual de presión colocado cada 10º), respecto del origen (Fujisawa N. & Gotoh, F., 1994; Fujisawa N., 1992; McTavish et al, 2012). Los valores del brazo de palanca dependen del ángulo del álabe Φ.

Para el álabe de avance, se calculan los valores de r dividiéndolos en 4 rangos que abarcan los puntos de presión del 1-8, 9, 10-14 y 15-17, según donde se halle el punto de aplicación de la fuerza respecto al origen. Luego, los valores de r en el álabe de retroceso, son los mismos que para el álabe de avance pero de signo contrario. El origen se encuentra en a/2, es decir, a la mitad de la distancia entre álabes.

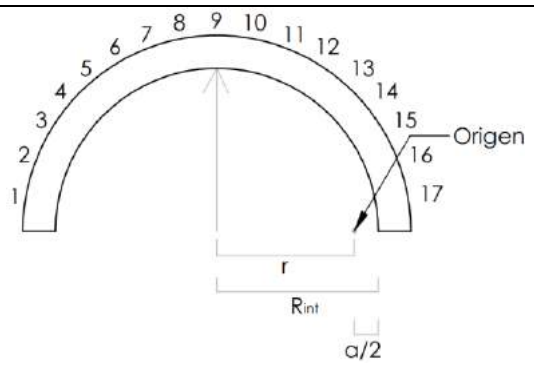
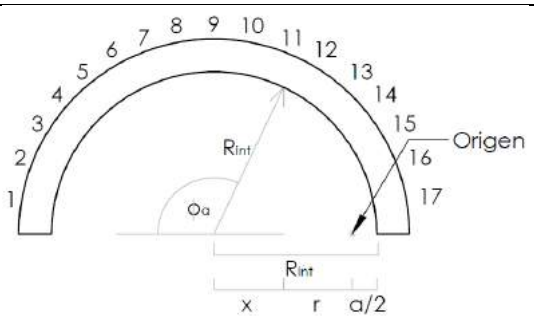
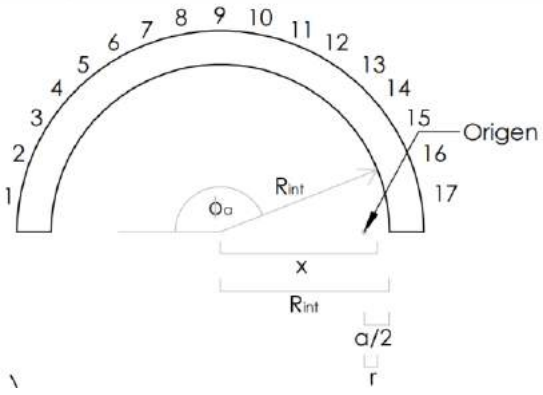
En las tablas II y III, se observa el cálculo del brazo de palanca para ambos álabes, planteando donde se encuentra el origen y enumerando los puntos de presión.

Álabe de avance

Tabla II. Cálculo del brazo de palanca en el álabe avance con un ángulo de rotor de 0º (elaboración propia).

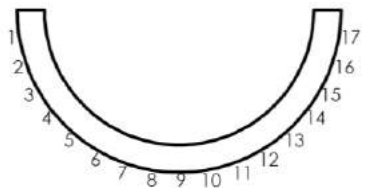
	Puntos del 1 al 8 $r = x + (R_{int} - \frac{a}{2})$ $x = cos(\Phi_a) * R_{int}$

 ISBN 978-987-1323-66-1

	Punto 9 $r = R_{int} - \frac{a}{2}$
	Puntos del 10 al 14 $r = R_{int} - x - \frac{a}{2}$ $x = cos(180 - \Phi_a) * R_{int}$
	Puntos del 15 al 17 $r = \left(x - R_{int} + \frac{a}{2}\right) * (-1)$ $x = cos(180 - \Phi_a) * R_{int}$

Álabe de retroceso

Tabla III. Cálculo del brazo de palanca en el álabe de retroceso con un ángulo de rotor de 0º (elaboración propia).

	Puntos del 1 al 3. Idem a puntos 15 al 17 del álabe avance, pero signo de r contrario. Puntos del 4 al 8. Idem a puntos 10 al 14 del álabe avance, pero signo de r contrario. Punto 9. Idem a punto 9 del álabe avance, pero signo de r contrario. Puntos del 10 al 17. Idem a puntos 1 al 8 del álabe avance, pero signo de r contrario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 5 se observan los contornos de presión obtenidos para un aerogenerador Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y un número de Reynolds de 120000.

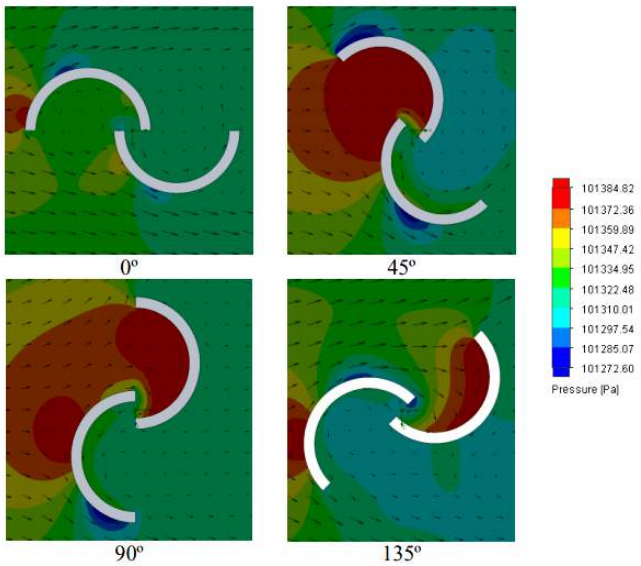


Figura 5. Contornos de presión obtenidos para ángulos de rotor de 0°,45°,90° y 135°.

En las figuras 6,7,8 y 9, se observan los coeficientes de presión calculados a partir las simulaciones, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales. Se verifica que las tendencias de las curvas son similares y tienen los mismos órdenes de magnitud. Las diferencias entre ambos pueden reducirse con el ajuste de los parámetros de simulación. En el álabe de avance (ángulos de álabe de 0º a 180º), las presiones en la superficie cóncava son mayores que las presiones de la superficie convexa, para los ángulos de rotor de 45°, 90° y 135º. En el álabe de retroceso (ángulos de álabe de 180º a 360º), las presiones de la superficie convexa son mayores que las presiones de la superficie cóncava para un ángulo del rotor de 135°; y para un ángulo del rotor de 0°, se observan diferencias en los coeficientes de presión obtenidos para el lado convexo.

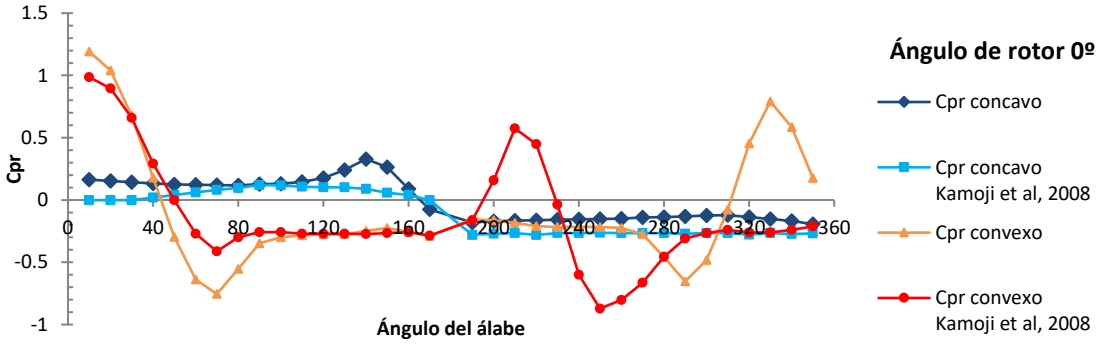


Figura 6. Coeficientes de presión obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

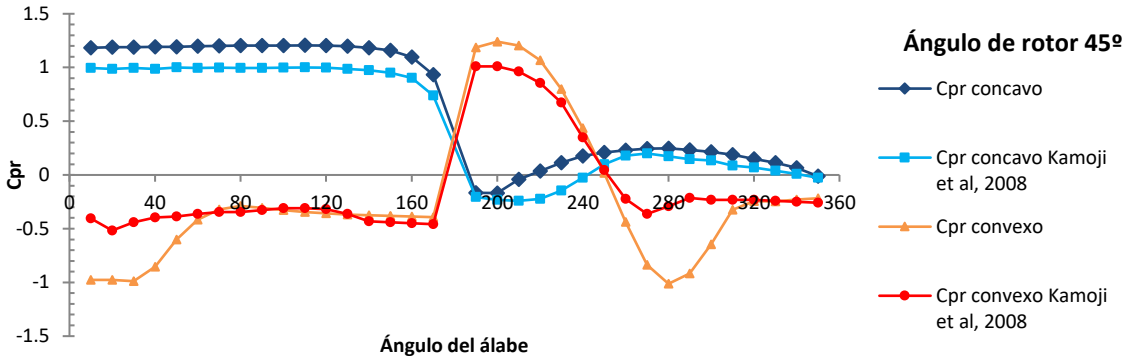


Figura. 7 Coeficientes de presión obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

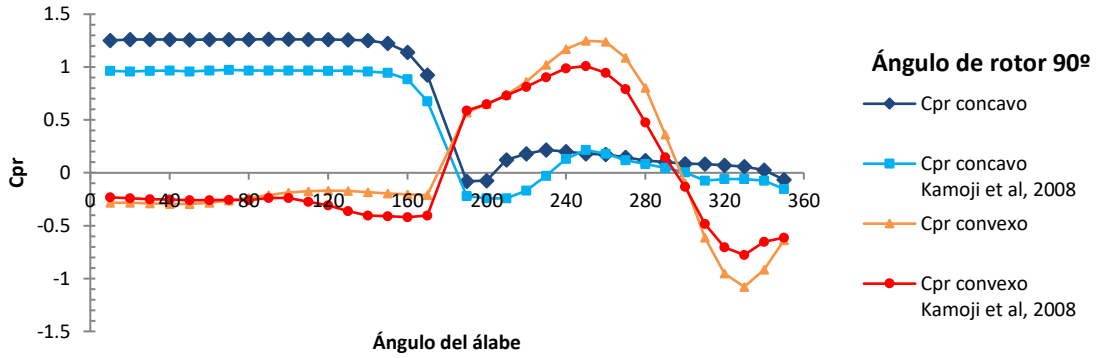


Figura 8. Coeficientes de presión obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

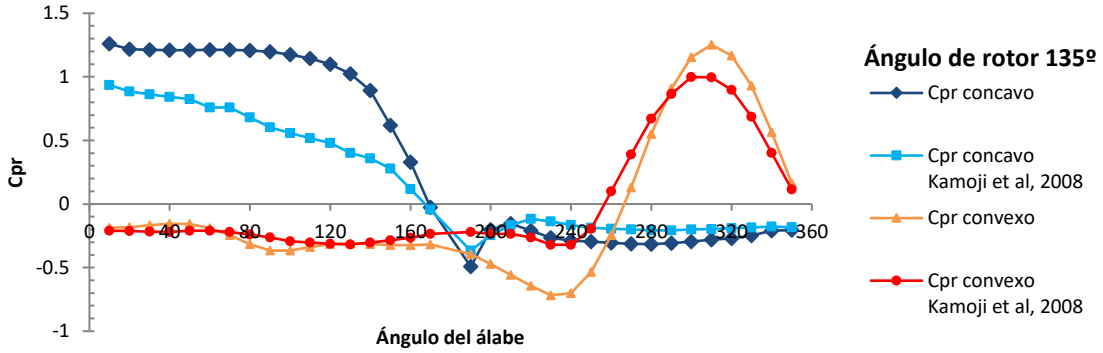


Figura 9. Coeficientes de presión obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de las simulaciones, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

En las figuras 10,11,12 y 13, se observan los coeficientes locales estáticos de torque calculados a partir de los coeficientes de presión, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales. Se observa que las tendencias de las curvas no son similares. Tanto en el álabe de avance como en el de retroceso, los coeficientes locales estáticos de torque toman valores positivos y negativos para todos los ángulos de rotor. El valor máximo del coeficiente local estático de torque, tanto para los calculados mediante simulaciones como para los obtenidos mediante resultados experimentales, aumenta con el aumento de ángulo del rotor de 0° a 45°, y disminuye a medida que el ángulo del rotor aumenta de 45° a 135°. Las diferencias de presiones entre las superficies cóncavas y

convexas en el álabe de avance contribuyen a los coeficientes locales estáticos de torque positivo para todos los ángulos de rotor.

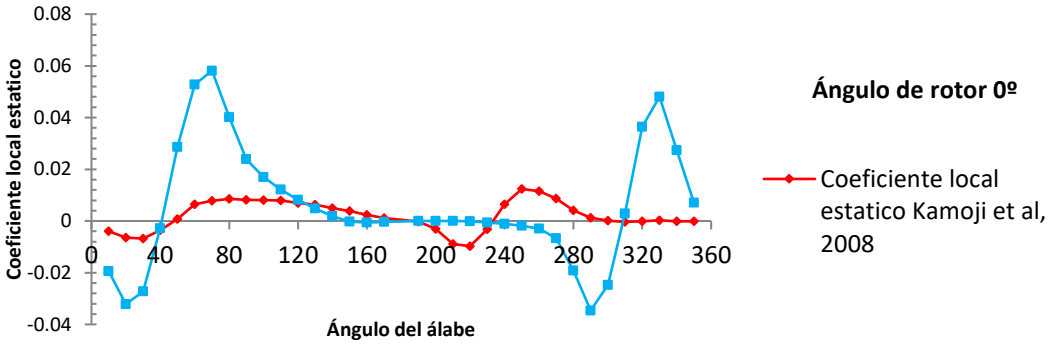


Figura 10. Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

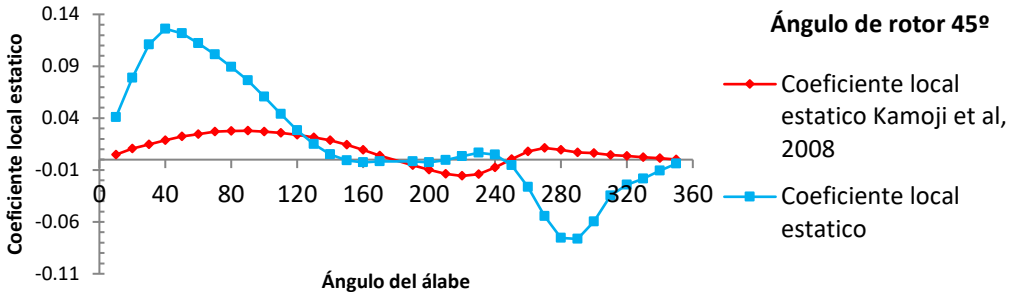


Figura 11. Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

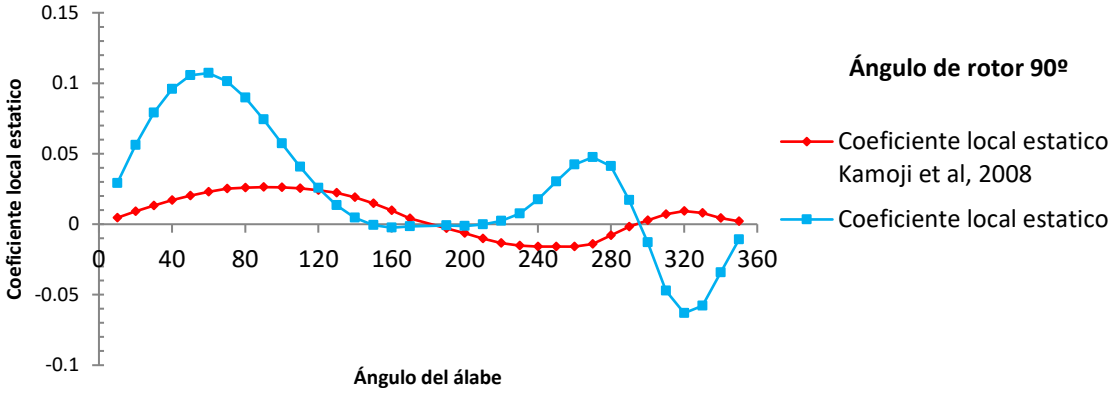


Figura 12. Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

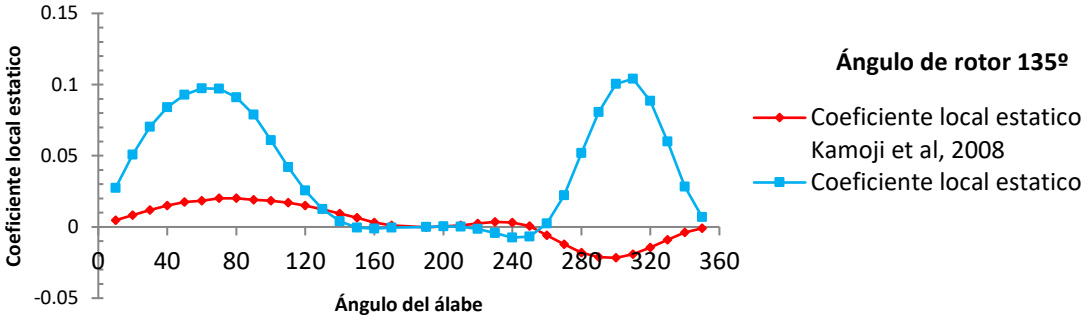


Figura 13. Coeficientes locales estáticos de torque obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

En la figura 14, se observan los coeficientes estáticos de torque calculados a partir de los coeficientes de presión, y se comparan con los obtenidos mediante resultados experimentales de Kamoji et al, 2008. En los resultados experimentales, se produce un incremento del coeficiente estático de torque para ángulos de rotor de 0° a 45°, y luego disminuye con el aumento del ángulo del rotor entre 45° a 165°, haciéndose negativo en 165º. Para los coeficientes estáticos de torque calculados, sólo los extremos de la curva son similares a los resultados experimentales. El incremento y la disminución del coeficiente estático de torque, se debe a los aportes positivos/negativos por parte de los coeficientes de presión.

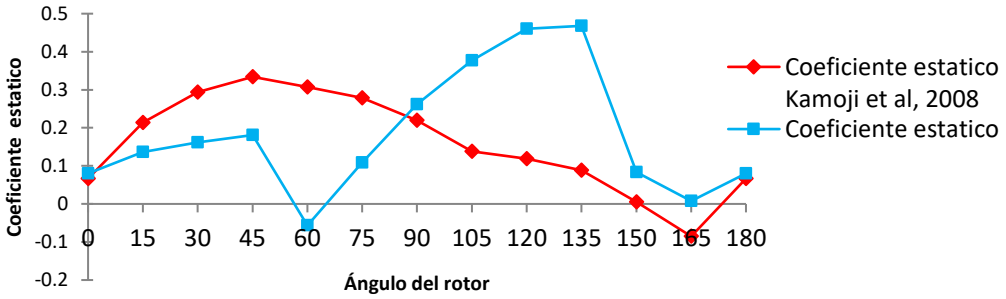


Figura 14. Coeficientes estáticos de torque obtenidos en el artículo de Kamoji et al, 2008 y calculados a partir de los coeficientes de presión, para un Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15 y número de Reynolds de 120000.

CONCLUSIONES

Se diseñó un aerogenerador tipo Savonius de álabes semicirculares con una relación de superposición de 0.15, y se obtuvieron las presiones totales promedio en puntos, mediante simulaciones en SolidWorks Flow Simulation® empleando un número de Reynolds de 120000. Con el método de cálculo propuesto por Kamoji et al, 2008; Fujisawa N., 1992; y Fujisawa N. & Gotoh, F., 1992, se hallaron los coeficientes estáticos de torque y se compararon con los resultados obtenidos experimentalmente por Kamoji et al, 2008.

Se observó que los coeficientes de presión muestran tendencias similares y órdenes de magnitud comparables con los resultados obtenidos experimentalmente por Kamoji et al, 2008. Esas diferencias pueden reducirse con el ajuste de los parámetros de simulación. Ello implicaría, cambiar las condiciones de mallado y dominio computacional principalmente, con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados. Se observó que las tendencias de las curvas no son similares para los coeficientes locales estáticos y los coeficientes estáticos de torque.

Por otro lado, para hallar la relación de superposición óptima de los álabes, se pueden evaluar los coeficientes estáticos de torque. Por lo tanto, utilizando el método propuesto Kamoji et al, 2008; Fujisawa N., 1992; y Fujisawa N. & Gotoh, F., 1992, se pueden realizar simulaciones con distintas configuraciones de Savonius y evaluar los resultados de los coeficientes estáticos de torque (Kamoji et al, 2008; Olaoye O. S. & Adeoye O., 2016). La relación de superposición óptima de los álabes, será aquella de la que se obtengan los valores más altos, positivos y mejor distribuidos de los coeficientes estáticos de torque. Además, al trazar el coeficiente estático de torque en función del ángulo de rotor, para diferentes geometrías de Savonius, se pueden comparar las capacidades de arranque automático de estos modelos (Zhao et al, 2019).

REFERENCIAS

Akwa, J.V., Alves da Silva Júnior, G. & Petry, A.P., "Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics", Elsevier, Renewable Energy 38, pp. 141-149 (2012).

Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P., "A review on the performance of Savonius wind turbines", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp. 3054-3064 (2012).

Amiri, M., Kahrom, M. & Teymourtash, A. R., "Aerodynamic Analysis of a Three-Bladed Pivoted Savonius Wind Turbine: Wind Tunnel Testing and Numerical Simulation", Journal of Applied Fluid Mechanics, vol. 12, no. 3, pp. 819-829 (2019).

Chávez-Cano, O., Muñoz-Hernández, G.A., Turiján-Altamirano, S.N. & Rodríguez-González, J., "Design and simulation of a vertical wind generator", Journal of Technology and Innovation, vol.6, no.18, pp. 27-33 (2019).

D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R. & Secchiaroli, A., "Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance", Elsevier, Energy 35, pp. 3349-3363 (2010).

Driss, Z., Mlayeh, O., Driss, D., Maaloul, M. & Abid, M.S., "Incidence Angle Effect on the Aerodynamic Structure of an Incurved Savonius Wind Rotor", Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring, Applied Condition Monitoring 2, pp. 101-110 (2015).

Fernando, M.S.U.K., "On the Performance and Wake Aerodynamics of the Savonius Wind Turbine", The University of British Columbia (1987).

Fujisawa, N. & Gotoh, F., "Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor", ASME journal of solar energy engineering, vol. 116, pp. 148-152 (1994).

Fujisawa, N. & Gotoh, F., "Pressure measurements and flow visualization study of a Savonius rotor", Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 39, pp. 51-60 (1992).

Fujisawa, N., "On the torque mechanism of Savonius rotors", Elsevier, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 40, pp. 277–292 (1992).

Hassanzadeh, A. R., Yaakob, O., Yasser, M. A. & Ismail, M.A., "Comparison of Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using Computational Fluid Dynamics", World Applied Sciences Journal 28, pp. 1113-1119 (2013).

Jaohindy,P., McTavish,S., Garde, F., Bastide, A., "An analysis of the transient forces acting on Savonius rotors with different aspect ratios", Elsevier, Renewable Energy 55, pp. 286-295 (2013).

Kamoji, M. A., Kedare, S. B. & Prabhu, S. V., "Experimental Investigations on the Effect of Overlap Ratio and Blade Edge Conditions on the Performance of Conventional Savonius Rotor", Wind engineering, vol. 32, no. 2, pp. 163–178 (2008).

McTavish,S., Feszty, D. & Sankar, T.,"Steady and rotating computational fluid dynamics simulations of a novel vertical axis wind turbine for small-scale power generation", Elsevier, Renewable Energy 41, pp. 171-179 (2012).

Menet, J.-L. & De Rezende, T. "Static and dynamic study of a conventional Savonius rotor using a numerical simulation", 21ème Congrès Français de Mécanique (2013).

Modi, V. J. & Fernando, M.S.U.K., “On the Performance of the Savonius Wind Turbine”, ASME journal of solar energy engineering, vol. 111, pp. 71-81 (1989).
Nasef, M.H., El-Askary, W.A., AbdEL-hamid, A.A. & Gad, H.E., “Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies”,Elsevier, Journal of Wind Engineering and IndustrialAerodynamics 123, pp. 1-11 (2013).
Olaoye, O. S. & Adeoye, O., “Numerical Investigation and Improvement of Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbine”, Iiste, Journal of Energy Technologies and Policy 6, pp. 34-43 (2016).
Sadrul Islam, A., Quamrul Islam, M., Mandal, A., & Razzaque, M., “Aerodynamic characteristics of a Stationary Savonius Rotor”, RERIC, International Energy Journal 15, pp. 125-136 (1993).
Widodo, W.S., Chin, A.C., Haeryip Sihombing & Yuhazri, M.Y. “Design and Analysis of 5 kW Savonius Rotor Blade”, Global Engineers & Technologists Review, vol.2, no.8, pp. 1-8 (2012).
Yaakob,O., Ahmed,Y.M. & Ismail, M.A., “Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation”, The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics (APHydro2012), CFD in Hydrodynamics, 3-4/09/2012, Malaysia, pp. 327-332.
Yaakob,O.B., Tawi, K.B. & Sunanto,D.T.S., “Computer Simulation Studies on the Effect Overlap Ratio for Savonius Type Vertical Axis Marine Current Turbine”, IJE Transactions A: Basics, vol. 23, no. 1, pp. 79-88 (2010).
Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J. & Reinecke, A., “Chapter 2 - 3D-printed miniature Savonious wind harvester”, Elsevier, Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters, pp. 21-165 (2019).

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG AL ANÁLISIS MORFOMETRICO DE LA CUENCA, DEL RÍO SAN PABLO, DEPTO. CAPAYÁN, CATAMARCA

Morales G. [a], Lobo A. P. [ab] y Purulla F. B. [a]

[a] *Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca*
[b] *Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, Catamarca.*

e-mail: gustavomorales.geo@gmail.com

RESUMEN

En la provincia de Catamarca, las crecientes repentinas y los procesos hídricos asociados, constituyen una amenaza dado que, por su condicionamiento natural, los cursos fluviales presentan características torrenciales. Las nuevas herramientas disponibles por los Sistemas de Información Geográficos resultan de gran utilidad a la hora de analizar la morfometría de las cuencas ya que permiten la visualización y determinación de las diferentes variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal ayudando al entendimiento del comportamiento hidrodinámico del sistema. El objetivo de este trabajo es presentar la metodología empleada para la caracterización y análisis de parámetros morfométricos de la cuenca del río San Pablo, ubicada en el departamento Capayán, provincia de Catamarca, a partir del uso de las herramientas de análisis hidrológicos presentes en el módulo Arc Hydro de ARC GIS. Se determinaron y analizaron para la cuenca en estudio los parámetros de forma, relieve y las características de la red de drenaje concluyendo que la metodología empleada en el análisis morfométrico de la cuenca del río San Pablo, mediante el uso de herramientas SIG, ha acortado notablemente los tiempos destinados al trabajo de gabinete. Además, permitió el reconocimiento de los rasgos morfológicos de la misma y facilitó el análisis de los procesos que ayudan a interpretar la dinámica de este sistema fluvial.

Palabras Claves: SIG, Parámetros Morfométricos, Cuenca, San Pablo.

INTRODUCCION

Los sistemas fluviales presentan características topográficas, litológicas y fitogeográficas propias del ambiente geográfico donde se desarrollan. Aun cuando dos cuencas estén sometidas a fenómenos climáticos similares, los regímenes de escorrentía superficial pueden ser muy diferentes dadas las características físicas de cada una de las cuencas. Así podemos decir que la geometría, tamaño, longitud y topografía de la cuenca adquiere relevancia en el comportamiento de la misma ante precipitaciones intensas, condicionando en cierta forma el escurrimiento. Las nuevas herramientas disponibles por los Sistemas de Información Geográficos resultan de gran utilidad a la hora de analizar la morfometría de las cuencas ya que permiten la visualización y determinación de las diferentes variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal ayudando al entendimiento del comportamiento hidrodinámico del sistema, reduciendo significativamente los tiempos de procesamiento.

La cuenca en estudio se ubica en la ladera oriental de la Sierra de Ambato y está integrada por los ríos El Simbolar, y Pampichuela, en cuya confluencia cambia su nombre con rumbo NNO-SSE por el río San Pablo, atravesando la localidad homónima para

finalmente drenar sus aguas sobre el río Del Valle en el departamento Valle Viejo, ver Fig. 1

Los procesos de remoción en masa se ven favorecidos por la evidente reactivación tectónica que está teniendo lugar en la región, que se manifiesta en la recurrencia de eventos sísmicos de intensidad media, lo cual incide de manera indirecta en la estabilidad de las laderas, las que, en general presentan escasa o nula vegetación El material, producto de estos procesos, se acumula en los cauces en periodos de sequía de las cuencas; en caso de precipitaciones, el agua moviliza estos materiales de manera que puede provocar barreras que se traducen en endicamientos, obturando el paso del fluido y generando en consecuencia aludes.

La zona en estudio posee un clima cálido, de tipo árido de sierras y bolsones, con escasas precipitaciones, 300 mm anuales, concentrados en los meses de verano, con fuerte insolación, lo cual produce una fuerte evaporación, provocando la sequedad del suelo. Escasa nubosidad, fuertes vientos y temperaturas que alcanzan los 40º C, aunque la media anual es de 18 y 19º C. La vegetación predominante en la cuenca corresponde a la región fitogeográfica del Chaco Árido. En las sierras se encuentran yaretas y pastos duros. En los valles bajos la vegetación es más abundante y densa, con especies como el cebil, viscote y arrayán del cerro, molle, tala, coco y quebracho. En cuanto a la fauna, se encuentran especies como el zorro, corzuelas, conejos, liebres, y aves como cóndores y águilas.

El relieve del área de estudio presenta un marcado contraste entre las formas de pendientes elevadas y las formas aplanadas, como expresión de los diversos procesos tectónicos, geomorfológicos e incluso de eventos neotectónicos que afectaron a la región durante el cuaternario, y que han actuado sobre distintas litologías modelando el paisaje. Se destacan los bloques de basamento separados por valles intermontanos. Las laderas de las sierras, típicas de ambiente rexistásico, con escasa cobertura vegetal o sin ella, exhiben conos de derrubios originados por el desprendimiento de bloques, auxiliados por la acción de la gravedad (Niz et al., 2018).

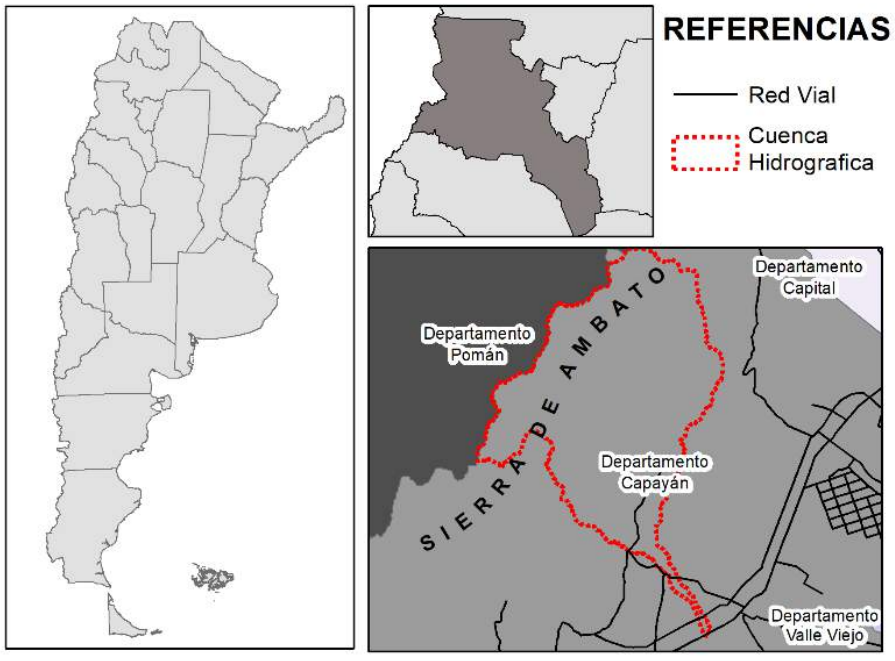


Figura 1. Área de estudio

METODOLOGIA

Para la delimitación, el trazado de la red de drenaje y la parametrización de la cuenca del río San Pablo se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) Alos Palsar de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA), con una resolución de 12,5 metros obtenido de https://search.asf.alaska.edu/#/ . La cuenca con su correspondiente red de drenaje fue trabajada con un sistema de información geográfico (SIG), a partir del cual se pudieron obtener las variables que permitieron calcular los parámetros morfométricos de la misma siguiendo la metodología propuesta por ESRI, en su manual de uso de ArcHydro Tools de Arc Gis, del año 2011.

La delimitación de la cuenca se realizó siguiendo en forma sistemática y en el mismo orden cada uno de pasos que se muestran en la figura 2 y que abajo se detallan.

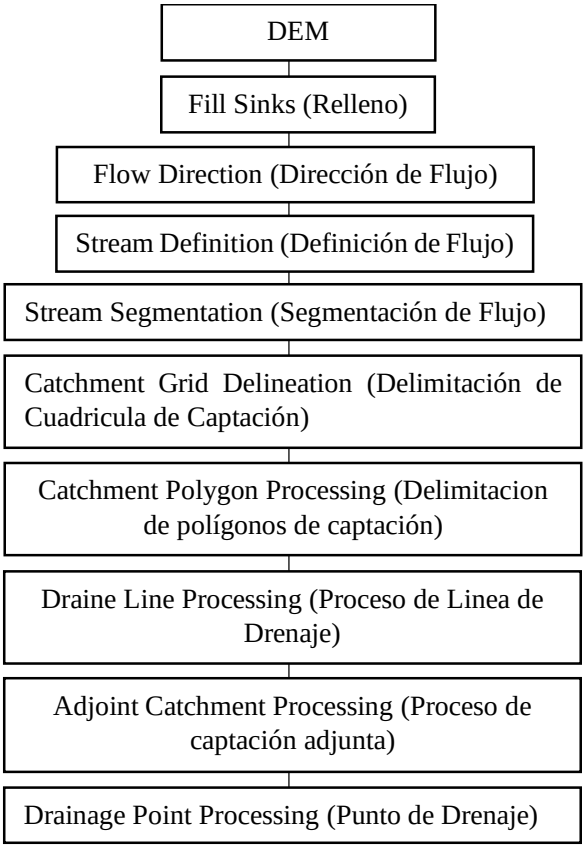


Figura 2. Esquema Metodológico para la delimitación de la cuenca del río San Pablo

Fill Sinks (Relleno de Depresiones): para corregir las imperfecciones del modelo digital de elevación se realizó un pre procesamiento del mismo, que consistió en rellenar aquellas celdas que se encuentran rodeadas por celdas de mayor elevación y que impiden el normal escurrimiento del flujo.

Flow Direction (Dirección de Flujo): con este proceso se determinó la dirección del flujo marcada por el descenso más empinado o con máxima pendiente de cada celda, ver Fig.3

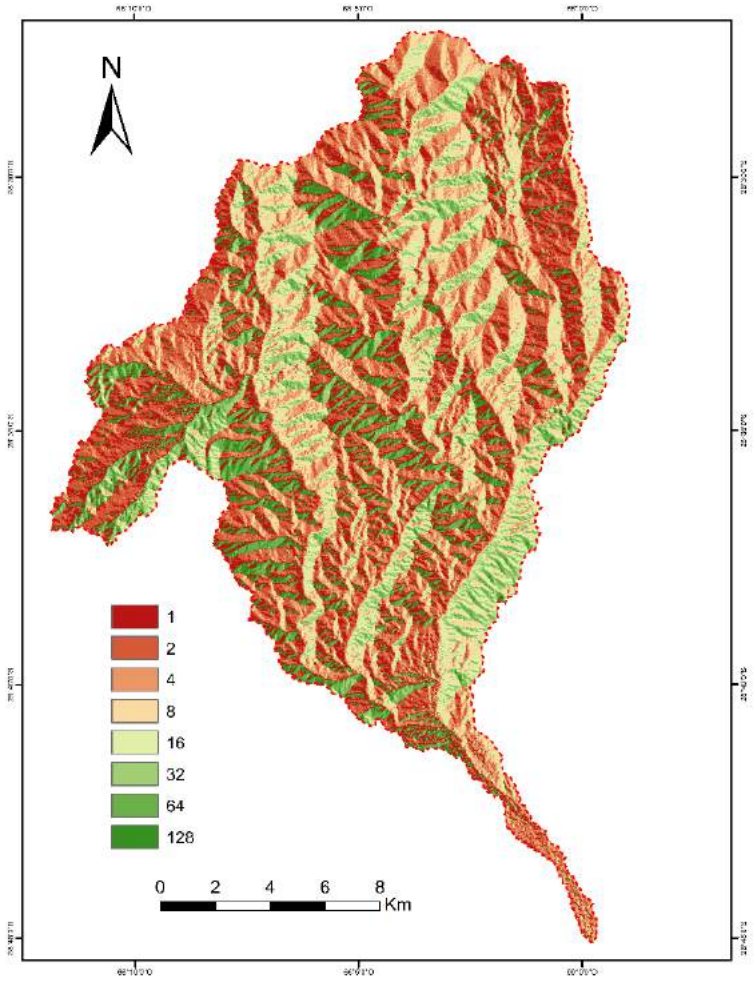


Figura 3. Dirección de Flujo cuenca del río San Pablo

Flow Accumulation (Acumulación de Flujo): se calculó el flujo acumulado para cada celda comparando la celda en análisis con las celdas vecinas que fluyen hacia ella.
Stream Definition (Definición de Flujo): se definió el escurrimiento superficial basado en la cuadrícula del flujo acumulado. Para este proceso fue necesario definir un umbral de análisis que representa la superficie o región sobre la que se definirá la red de drenaje. Para el caso de la cuenca del río San Pablo el mismo se fijó en 1 Km^2
Stream Segmentation (Segmentación de Flujo): en éste paso se obtuvo la red de drenaje básica de la cuenca en análisis.
Catchment Grid Delineation (Delimitación de Cuadrícula de Captación): se creó una cuadrícula de captación de flujo en la que cada celda lleva un valor que indica a que captación pertenece la celda. El área de captación del flujo estará en función de la red de drenaje básica obtenida.
Catchment Polygon Processing (Delimitación de Polígonos de Captación): se convirtió el resultado anterior en una entidad de polígonos que representa las áreas de captación de flujo asociadas a la red de drenaje determinada, ver Fig.4.

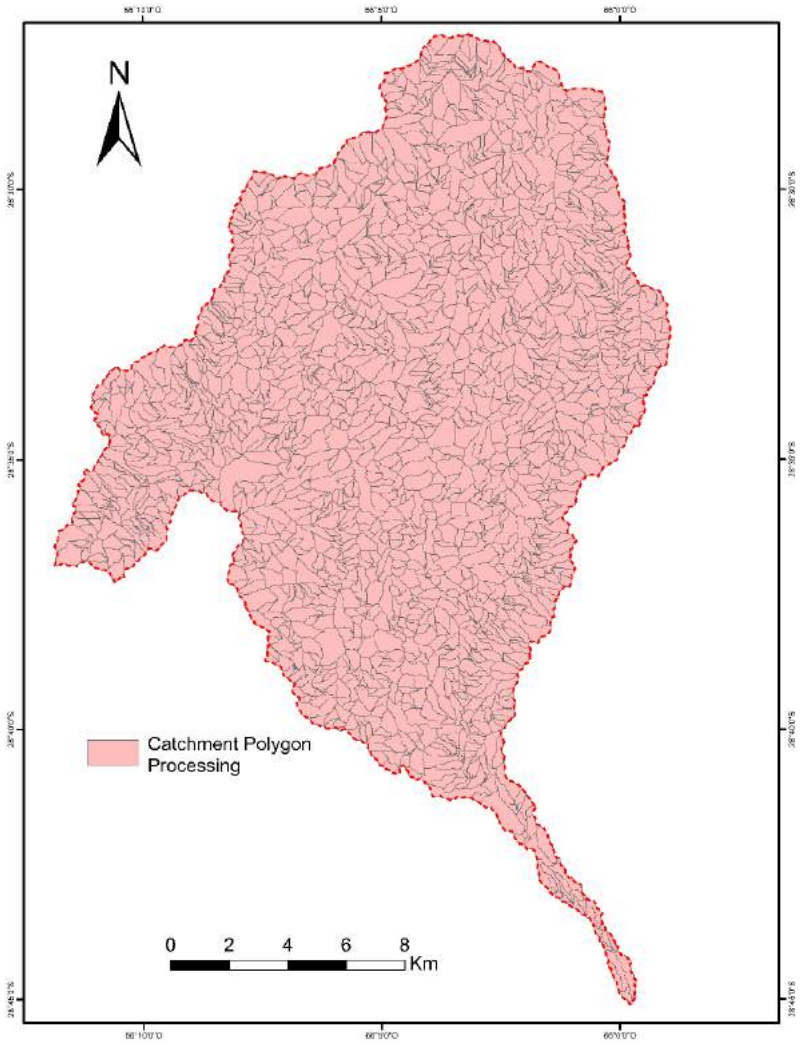


Figura 4. Delimitación de las áreas de captación de flujo

Draine Line Processing (Proceso de Línea de Drenaje): convierte la cuadrícula de Stream Definition en líneas de drenaje, ver figura Fig.5

Adjoint Catchment Processing (Proceso de Captación Adjunta): genera las subcuencas hidrográficas aguas arriba de otras subcuencas.

Drainage Point Processing (Punto de Drenaje): genera los puntos de salidas asociado a cada subcuencas, determinadas.

Point Delineation (Definición del Punto de Salida): se delimitó la cuenca del río San Pablo colocando su punto de salida aguas abajo del puente de la ruta aguas abajo del puente de la ruta N°38.

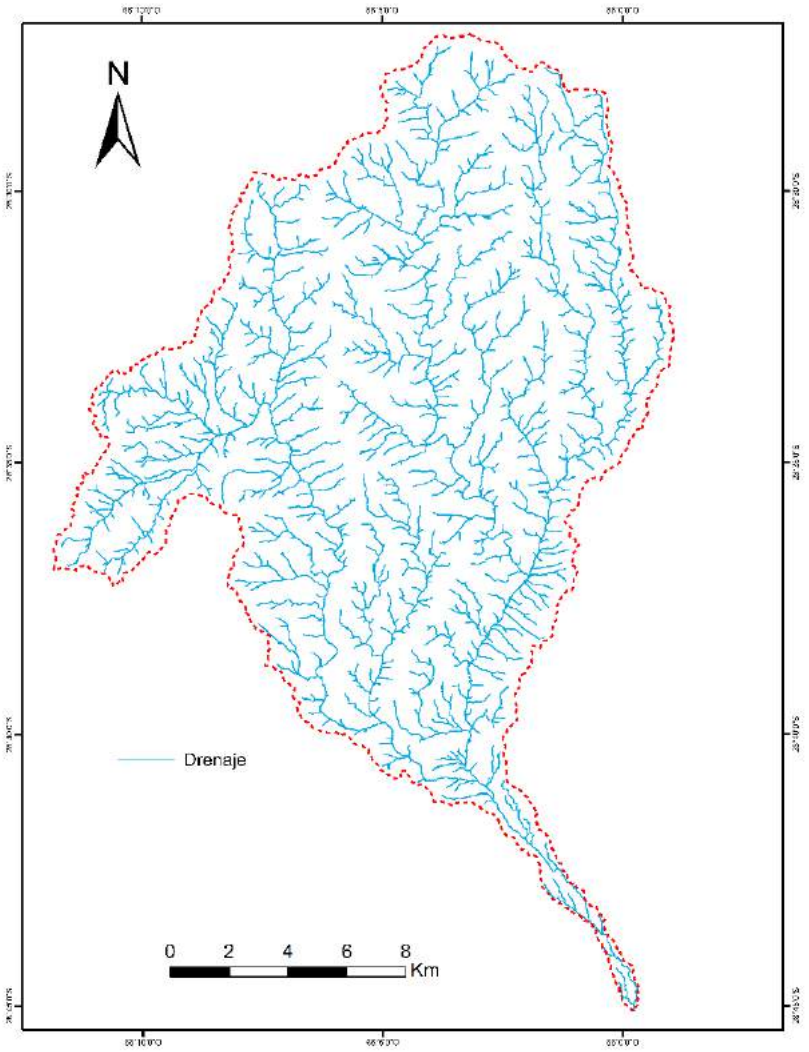


Figura 5. Definición de la red de drenaje

Una vez delimitada la cuenca, las variables morfométricas como área, perímetro, y longitud axial se determinaron en forma directa usando la calculadora de geometría disponible en Arc Gis. La forma de la cuenca fue analizada mediante el cálculo del facto de forma, el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, y el radio de circularidad cuyas ecuaciones se consignan en la tabla 1.

Una vez obtenidos los factores que caracterizan la forma de la cuenca del río San Pablo se procedió a la determinación de los parámetros de altitud de la misma, utilizando para ello herramientas de Arc Gis, herramientas de archydro y una plantilla excell. Las variables de relieve determinadas fueron, altura máxima, mínima, y media de la cuenca, desnivel absoluto calculado como diferencia entre el máximo y mínimo nivel, y la pendiente media de la cuenca (Pend) en (%) que brinda información sobre la característica de los hidrogramas ya que las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con más celeridad ante las precipitaciones. La curva hipsométrica es la forma más conveniente y objetiva para describir la relación entre las características de la cuenca en el plano y las alturas. Según Strahler, la curva hipsométrica es un reflejo del estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca (Llamas, 1993). Para la determinación de la misma se procedió a cortar el DEM utilizando para ello el polígono de la cuenca del río San Pablo,

mediante la herramienta Data Management Tool ubicada en Arc Tool Box de Arc Gis, ver Fig. 6

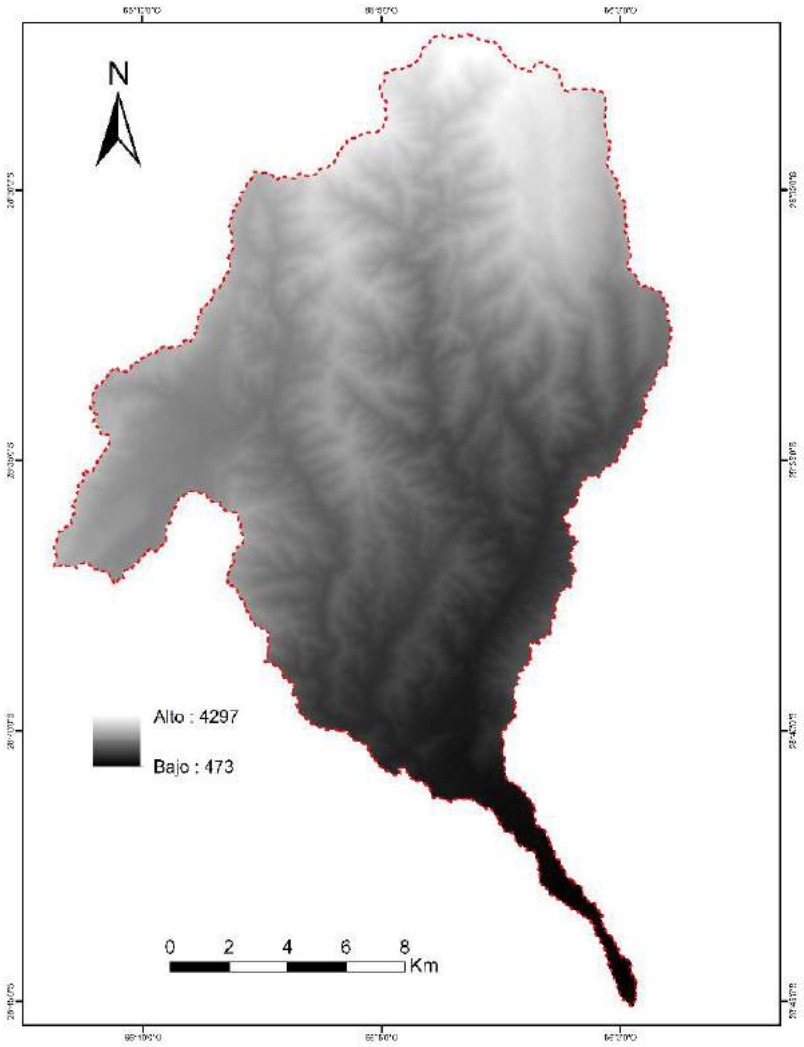


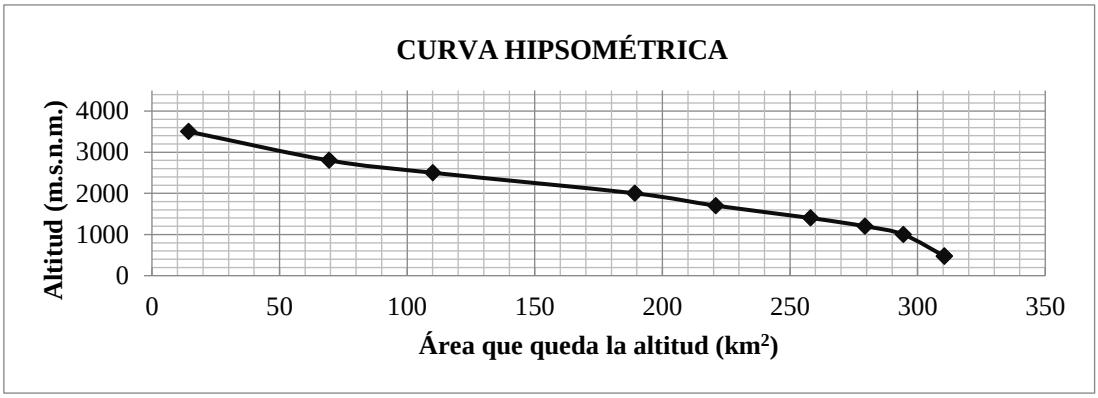
Figura 6: Modelo digital de elevaciones perteneciente a la cuenca del río San Pablo

Una vez cortado el DEM con la forma de la cuenca en estudio se procedió a reclasificar el mismo por rango de altitudes, utilizando la herramienta Reclass ubicada en Spatial Analyst Tool. Para obtener los intervalos de altitudes y las áreas que contiene cada uno de los mismos fue necesario extraer la información estadística necesaria del DEM en forma de tabla, mediante la herramienta Zonal Statistics as Table ubicada en Spatial Analyst Tool. Por último, se graficó en una plantilla de Excel, las cotas mínimas de cada intervalo en el eje de las abscisas y el área que queda sobre la superficie correspondiente a esas cotas en el eje de las ordenadas obteniendo así la curva hipsométrica del río San Pablo, la cual se comparó con las curvas características que representan el grado de evolución del relieve de una cuenca, ver Fig. 7.

Para el análisis de la red de drenaje de la cuenca y su número de orden, se utilizó el criterio de Strahler que consiste en asignarle un número a cada uno de los cursos tributarios desde el inicio de la línea divisora de aguas hasta llegar al cauce principal de manera que el número final señale el orden de la red de drenaje en la cuenca. Para ello se utilizó la

herramienta Hydrology de Arc Tool Box, donde en primer lugar se procedió a la definición de la red de drenaje aplicando un proceso llamado Stream Link para luego mediante la herramienta Stream Order asignarle un número de orden a cada tributario, ver Fig.8.

a.



b.

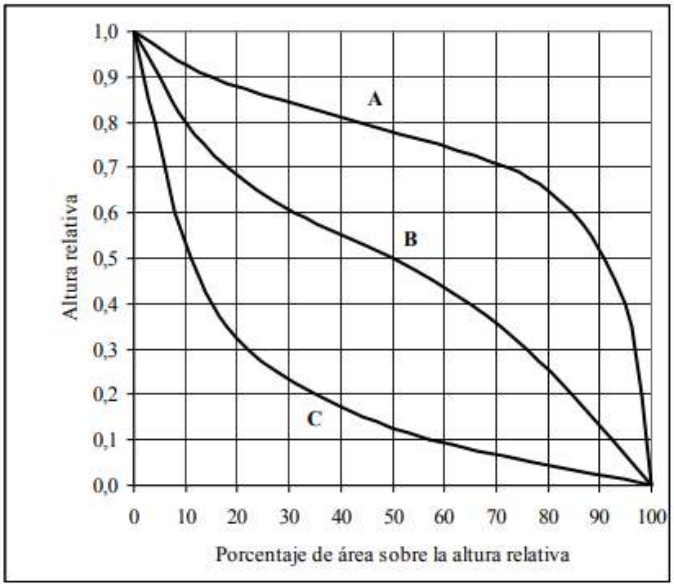


Figura 7. a. Curva hipsométrica cuenca del río San Pablo. **b.** Curvas hipsométricas característica del ciclo de erosión según Stahler. Fuente: (Llamas, 1993).

Para poder trabajar numéricamente la red de drenaje a cuyos tributarios ya les fue asignados un número de orden, se transformó la capa obtenida a formato vectorial tarea para la que se usó la herramienta Stream to Feature. La densidad de drenaje (Dd) fue establecida por Horton según el cociente entre la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca, valor obtenido de la sumatoria de todas las longitudes que componen la red de drenaje mediante la función statistics y el área total de la cuenca. Para completar la caracterización se procedió al análisis de la red de drenaje mediante la determinación de las variables que explican la configuración y el comportamiento del flujo como la longitud y pendiente del cauce principal, datos que fueron calculados en forma directa por la herramienta Longest Flow Path for Whatershed contenida en el módulo Watershed Processing de Arc Hydro.

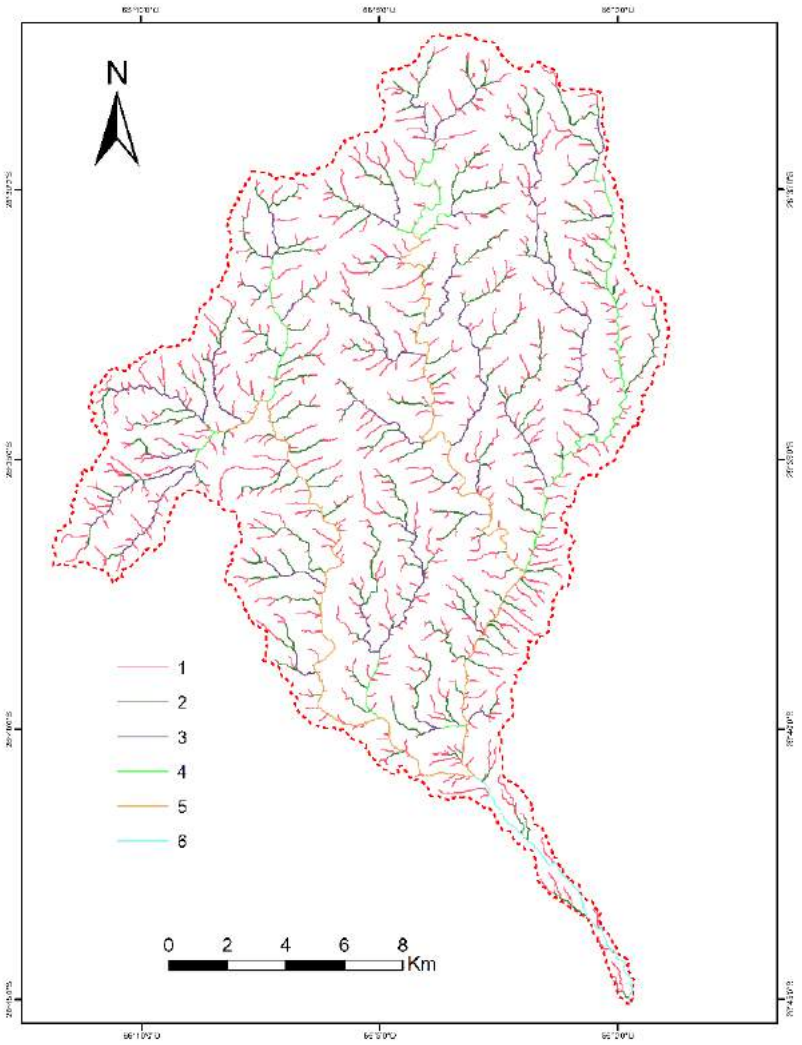


Figura 8. Número de orden de la red de drenaje

Por último, con la longitud del cauce principal en metros (L) y la pendiente (S) del mismo en m/m se determinó el tiempo de concentración de la cuenca usando para ello la fórmula de Kirpich. El Tiempo de concentración define el tiempo que transcurre entre el inicio de la precipitación y el establecimiento del gasto de equilibrio, es decir, el tiempo que tarda el agua en pasar por el punto más alejado a la salida de la cuenca. (Mijares, 1999). Esta última variable adquiere una vital importancia en el establecimiento del caudal de diseño y depende fundamentalmente de las características del cauce principal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados morfométricos realizados mediante el análisis con SIG, permitieron generar una cartografía temática descriptiva de la cuenca en estudio.

El análisis de los resultados presentados en la Tabla 1 establece que: en términos generales la cuenca del río San Pablo posee un desarrollo longitudinal en sentido NO-SE. Con un área de 310,42 km^2 es una cuenca intermedia pequeña según la clasificación de Aranda, 1992 citado en Caminos, 2018.

Tabla 1. Resultados

Identificador	Unidad	Ecuación	Resultado
Área de la cuenca (A)	km^2	Medición Directa	310,42
Perímetro de la cuenca (P)	km	Medición Directa	145,82
Ancho promedio de la cuenca (Wp)	km	A/L	6,13
Longitud del cauce principal (L)	km	L	50,63
Longitud total de ríos(Ln)	km	Ln	703,99
Radio de Circularidad	km	$(4\pi A)/P^2$	0,18
Factor de forma	-	A/L^2	0,12
Coeficiente de compacidad de Graveluis (Kc)	-	$0.28\ P/(A)^{1/2}$	2,33
Pendiente media de la cuenca	%	Medición Directa	52.24
Altitud media de la cuenca	m.s.n.m.	Medición Directa	2215
Altitud máxima de la cuenca	m.s.n.m.	Medición Directa	4295
Altitud mínima de la cuenca	m.s.n.m.	Medición Directa	473
Pendiente media del cauce principal (S)	m/m	Medición Directa	0,075
Número de orden de la cuenca	-	Medición Directa	6
Densidad de drenaje	km/km^2	Ln/A	2,27
Patrón de la red de drenaje	-	Dendrítica	-
Número de cauces de orden 1 (N1)			987
Tiempo de Concentración (Tc)	hs	$Tc = 0.000325\ (L^{0,77}/S^{0,385})$	3.68

Con un factor de forma de 0.12 y según la clasificación de Pérez, 1979 citado en Córdova, 2016 la cuenca del río San Pablo presenta una forma muy alargada y con una geometría de forma rectangular, obtenida en función del índice de compacidad como se expresa en la clasificación sugerida por Gaspari et al., 2012. Las cuencas alargadas, se caracterizan por poseer un largo canal principal recolector y tributarios cortos y pocos ramificados, por lo que el hidrograma de crecientes se presenta achatado ya que el agua que proviene de los tributarios presenta una larga circulación a través del cauce principal, además el agua de los tributarios cercanos a la cabecera tarda mucho tiempo en llegar a la desembocadura y el agua de los tributarios próximos al cierre lo hace más rápido, por lo que la descarga se atenúa en la salida de la cuenca alcanzando un caudal pico inferior pero que llega más rápido a la salida

Del análisis de los parámetros de relieve se puede visualizar que la cuenca alcanza una importante diferencia altitudinal de 3822 m en un corto trayecto presentando así una pendiente media de 52.24 % lo que da la pauta de un relieve escarpado que favorece los procesos erosivos y de remoción en masa, como así también a una pronunciada velocidad del escurrimiento superficial. La fig. 6 presenta el mapa del modelo digital de elevación cuya cota mínima es 499 m.s.n.m. y la máxima es de 4295 m.s.n.m.

Debido a que la pendiente media del cauce principal del 8 % cae en el rango de moderada según la clasificación dada por Vera, 2004 citado en Caminos et al.,2018 podemos decir que la velocidad de escurrimiento superficial disminuye cuando el mismo desemboca en el cauce principal.

La curva hipsométrica adimensional correspondiente a la cuenca en estudio se asemeja más a la curva característica de una cuenca en fase de equilibrio como se observa en la Fig.7.

Según la clasificación dada por Ibal, 2009 la cuenca del río San Pablo presenta una densidad de drenaje moderada, valor frecuente en cuencas de suelo semipermeables y pendientes fuertes.

Según el criterio de Strahler la cuenca del río San Pablo es de orden 6 para un umbral de 1 km^2, el cual representa la superficie límite sobre la que una vez determinada la dirección

del flujo, el mismo se acumula para definir la red de drenaje. Éste umbral de superficie define la escala de los tributarios analizados y está en función de la cantidad de detalle de la red que se desee obtener. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico con un aumento continuo de los tributarios desde la desembocadura hacia la cabecera, ver Fig. 8.

Por último, el tiempo de concentración de la cuenca es de 3.68 horas, siendo el mismo, un valor bajo para permitir altas tasas de infiltración y alimentación de flujo subsuperficial y subterráneo.

CONCLUSIONES

La cuenca del río San Pablo presenta un desarrollo longitudinal en sentido NO-SE.

Los índices de forma revelan una cuenca rectangular muy alargada de tamaño intermedio a pequeño atenuando debido a su forma la descarga con un caudal pico inferior pero que llega más rápido a la salida de la cuenca.

El alto porcentaje de la pendiente media de la cuenca favorece los procesos erosivos, de remoción en masa e incrementa la velocidad del escurrimiento superficial.

La moderada pendiente media que presenta el cauce principal podría originar una disminución de la velocidad del flujo al entrar y transitar por el cauce principal.

La curva hipsométrica adimensional de la cuenca en estudio se asemeja más a la curva característica de una cuenca en fase de equilibrio.

El análisis de la red de drenaje determina una densidad de drenaje moderada lo que podría representar una respuesta moderada de la cuenca ante una tormenta.

El patrón de la red de drenaje de la cuenca es dendrítico presentando un aumento continuo de los tributarios desde la desembocadura hacia la cabecera.

La pendiente, forma y densidad de drenaje permitió una aproximación al entendimiento del sistema hídrico analizado.

El análisis geoespacial logrado con SIG, constituyó un aporte fundamental en la determinación de las diferentes variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal sobre la extensión de la red de drenaje y dinámica hídrica.

El entendimiento del comportamiento hidrodinámico de la cuenca del río San Pablo resulta vital a la hora de gestionar programas de prevención de riesgo de desastres naturales en la zona, sin embargo, se recomienda considerar las intervenciones antrópicas que puedan afectar la dinámica del sistema fluvial.

Por último, la metodología propuesta presenta un método rápido de determinación y análisis de las características morfométricas de las cuencas hidrográficas disminuyendo considerablemente los tiempos de procesamiento.

REFERENCIAS

Aparicio Mijares, F., *Fundamento de Hidrología de Superficie*, Editorial Limusa, México, (1996).

Camino, M., Bo, M., Cionchi, J., Lopez, A., Del Río, J., De Marc, S., Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27 (1), 73-97, 2018.

Córdova, M. Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográfica, PRONTUBEAN *https://prontubeam.com/articulos/articulos2016/04_2016_param_geom_cuencas/04_2016_param_geom_cuencas_articulo.pdf/*. 20.8.2020

ESRI. Arc Hydro Tools – Tutorial. 380 New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA. 2011.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Besteiro, S., Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, *AUGMDOMUS*, 4:143-158, 2012

Ibal, Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de las quebradas Las Panelas y La Balsa, CORTOLIMA.GOV.CO.https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/diagnostico/2.2aspectos_biofisicos.pdf. 20.8.2020, 2009.

Llamas, J. *Hidrología General. Principios y Aplicaciones*, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 1993.

Niz, A., Savio, C., Savio, M., Oviedo, J., Gafett, P., Vilches, F., Estudio diagnóstico sobre potencialidades de riesgo hídrico en Concepción y San Pablo - dpto. Capayán, Informe Parcial presentado a la Dirección de Hidrología de la provincia de Catamarca, 2018.

CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO EN ESTABLECIMIENTOS RURALES DEL PARTIDO DE MAGDALENA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES.

Moreiro Varela J. [a*]; Di Lello C. [ab] y Delgado M.I.[cd]

[a]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigaciones Geológicas, CONICET-Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[d] *División Ficología, Museo de La Plata. CONICET. Paseo del Bosque S/N, La Plata, ARGENTINA*

**e-mail: moreirojoaquin@gmail.com*

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue analizar la calidad del agua subterránea destinada a consumo doméstico y abrevado animal en establecimientos tamberos de pequeña escala del partido de Magdalena, provincia de Buenos Aires. Se hicieron dos campañas de muestreo, en meses con clima contrastante (enero y mayo), abarcando siete establecimientos productivos. Se realizaron encuestas y se recolectaron un total de 31 muestras, tomadas de perforaciones con bombas sumergibles, molinos y tanques de almacenamiento. Se midió in situ y en el laboratorio el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica del agua. Se determinó la concentración de los iones mayoritarios (CO_3^{-2}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{-2}, NO_3^-, Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+ y K^+) mediante métodos estandarizados. Los resultados obtenidos indicaron que el agua es mayoritariamente bicarbonatada sódica, con valores de pH y conductividad eléctrica dentro del rango establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA) como aptos para el consumo humano. Sólo en tres establecimientos el contenido de nitratos superó el límite establecido por la normativa (45 mg/L), siendo 58,44 mg/L el mayor valor encontrado en las muestras de mayo y 66,04 mg/L en las de enero. Por su parte, sólo en mayo la dureza superó el valor establecido como límite (400 mg/L) en uno de los predios donde también se obtuvieron las mayores concentraciones de nitrato. Se concluye que a pesar de relevarse condiciones no óptimas en algunos predios (proximidad entre la fuente de provisión y el pozo séptico o el tambo, desconocimiento sobre la existencia o características del encamisado, encharcamiento en la boca de la explotación), de acuerdo a la normativa vigente en el país y a las determinaciones físico-químicas realizadas, en la mayor parte de los establecimientos productivos visitados el agua utilizada no representaría un riesgo para la vida humana o del ganado, ni tampoco para las tareas productivas asociadas.

Palabras Clave: Concentración iónica, Agua subterránea, Establecimientos tamberos, Agricultura familiar.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se restringe al partido de Magdalena, el cual se encuentra en el noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (ver Fig. 1).
Las principales actividades productivas de la zona están representadas por la cría de ganado porcino, aves de corral (ponedoras y pollos parrilleros) y ganado bovino, que en algunos casos es de tipo intensivo. Además, este partido alberga una gran cantidad de

establecimientos lecheros, representados en su mayoría por pequeños productores enmarcados dentro de la agricultura familiar, la cual es definida como aquella donde la unidad doméstica y la unidad productiva están físicamente integradas. En este tipo de producciones generalmente la familia es quien aporta la fracción predominante de la fuerza de trabajo utilizada en la explotación, y la elaboración se dirige tanto al autoconsumo como al mercado (Ramilo, 2013). Gran parte de los contaminantes que pueden alterar la calidad del agua subterránea, incluidos los nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, se encuentran en las excretas del ganado (Morse, 1995; Herrero y Thiel, 2009; García et al., 2012), es así que la concentración de grandes cantidades de ellas conduce a la existencia de focos de contaminación que afectan a la calidad del agua subterránea y del suelo (Atkinson y Watson, 1996; Herrero y Gil, 2008; Viglizzo y Frank, 2010; García et al., 2012). Además, elevadas concentraciones de ciertas sales pueden ocasionar altos valores de dureza en el agua, la cual es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que al producirse sales insolubles se consuma más detergentes, además de darle un sabor indeseable al agua.

Por ello es que la evaluación de la calidad química del agua subterránea utilizada en establecimientos productivos como los tambos es de gran importancia, no sólo para la nutrición animal y limpieza de instalaciones sino también porque el personal rural utiliza la misma fuente de agua para el consumo domiciliario (Bruning-Fann y Kaneene, 1993).

Como consecuencia de la necesidad de provisión de alimentos para más de 6 billones de personas es que los ambientes naturales están sufriendo modificaciones a nivel planetario, con la consecuente expansión de áreas afectadas por actividades antrópicas (Foley et al., 2005). Es por ello que el aprovechamiento y gestión del agua debe basarse en una planificación que implique la participación de diversos actores, incluyendo tanto a los usuarios, como a los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles (Montico, 2004).



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El objetivo general fue analizar la calidad química del agua en establecimientos tamberos pertenecientes al partido de Magdalena. Se trabajó en pos de comprender las

principales variables que condicionan la calidad del agua destinada al consumo doméstico, abrevado animal e higiene de las instalaciones productivas, con el fin de contribuir a la elaboración de pautas de manejo que garanticen el acceso al agua segura y la inocuidad de los alimentos producidos.
Este trabajo de investigación es parte de un proyecto de Tesis Final de Licenciatura en Geología, desarrollado en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP), que a su vez se enmarca en un Proyecto de Investigación Básica y Aplicada (PRIBA).

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

El partido de Magdalena abarca unas 178.000 hectáreas y se desarrolla mayormente sobre una Planicie Continental o Llanura Alta (Auge, 1997), la que está integrada por limos arenosos de origen eólico (loess) y fluvial de edad Pleistocena. Estos sedimentos corresponden a la Fm. Pampeano o Sedimentos Pampeanos (Auge, 2005), con espesores cercanos a 45 m y alojan al acuífero freático homónimo, el que es principalmente explotado para abastecimiento en las áreas rurales.
Esta llanura se encuentra delimitada por una Planicie Costera (Fidalgo y Martínez, 1983; Cavallotto, 1995) la cual constituye una franja de unos 4 a 8 km de ancho paralela al estuario del Río de la Plata, con una pendiente imperceptible (Fucks et. al, 2017) y cubierta por Sedimentos Postpampeanos, los cuales están constituidos por arcillas y limos arcillosos y arenosos de origen marino, fluvial y lacustre (Auge, 2004).
El acuífero freático se recarga a partir de la infiltración del agua de lluvia (recarga autóctona y directa), lo que sucede principalmente en las divisorias. El flujo subterráneo regional es hacia el Río de la Plata, con descargas locales en los distintos cursos del área (Melo, 2019). Por otra parte, en la planicie costera, el acuífero freático se aloja tanto en los sedimentos Postpampeanos como en el Pampeano, aunque con un menor grado de infiltración de las precipitaciones como consecuencia de un grado de permeabilidad menor por la presencia de sedimentos arcillosos dominantes en la planicie costera.
En la región de estudio predominan los suelos Paleudoles (grupo de los Molisoles), que se caracterizan por un buen desarrollo y presencia de un horizonte argílico. Más cercano a la planicie costera comienzan a predominar los suelos de tipo Natracualf, los cuales pertenecen al grupo de los Alfisoles, y se caracterizan por ser suelos sódicos e imperfectamente drenados (INTA, 2011).
Se realizó la cartografía utilizando el Sistema de Información Geográfica QGIS 3.10.5, de Código Abierto y licenciado bajo GNU- General Public License. Las capas temáticas utilizadas fueron obtenidas a partir de geoservicios del INTA y del Instituto Geográfico Nacional (IGN). A su vez, a partir del procesamiento del Modelo de Elevación Digital (90 m de resolución) elaborado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Consultative Groupon International Agricultural Research (CGIAR) se identificaron las direcciones de drenaje superficial de los principales cursos de la zona.

Precipitaciones y balance hídrico

Se calculó la precipitación media mensual y anual para el período 1986–2019. Se realizó el balance hídrico utilizando la evapotranspiración potencial (ETP)

(Thornthwaite y Mather, 1957). A su vez, aplicando la misma metodología, se realizaron balances hídricos diarios para el período enero 2019–enero 2020, a fin de determinar las condiciones hidrológicas y así relacionar el déficit o exceso de agua al momento de los muestreos a campo. Los datos utilizados fueron suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020) a partir de la estación meteorológica La Plata Aero.

Encuestas a productores y toma de muestras

Se visitaron 7 establecimientos, de los cuales 6 eran tambos y 1 de ganadería extensiva, donde se realizaron encuestas cuyo objetivo era indagar sobre los posibles principales focos de contaminación de las instalaciones tamberas y evaluar la calidad del agua subterránea en todas las perforaciones de abastecimiento en los establecimientos, utilizadas tanto para consumo humano como para el desarrollo de tareas productivas. Cabe aclarar que la mayor parte de las instalaciones visitadas no contaban con estudios previos de la calidad del agua utilizada para los distintos usos.
Se tomaron un total de 31 muestras en dos campañas correspondientes a los meses de mayo de 2019 y enero de 2020. Las muestras de agua corresponden al acuífero freático (Acuífero Pampeano) y fueron extraídas de molinos, bombas sumergibles y de mano, de manera directa y de sus tanques de depósito domiciliario.
Se realizó la determinación *in situ* de pH, temperatura y conductividad eléctrica mediante un equipo multiparamétrico portátil. Las muestras fueron conservadas en un sistema refrigerado para su conservación óptima (APHA, 1998).

Determinaciones de laboratorio

Los análisis del contenido de iones mayoritarios se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET-UNLP), con métodos estandarizados (APHA, 1998), y con tres repeticiones por muestra. El 99 % de los resultados reportaron un error menor al 10 %. A su vez, se calculó la dureza del agua (mg/L), a partir de los contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} (Custodio y Llamas, 1996). La concentración de sales totales disueltas (STD) fue estimada a partir del valor de la conductividad eléctrica (Hem, 1985). La clasificación de los iones mayoritarios se realizó con el diagrama Piper (Piper, 1944), y para analizar la variación espacial y temporal de la química de las muestras se construyeron gráficos Stiff (Simler, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los siete establecimientos muestreados se encuentran sobre la Planicie Continental, la cual presenta cotas superiores a 5 msnm y hasta 30 msnm, con pendientes no mayores al 2%.
De todos los establecimientos, cinco (Ta1, Ta4, Cr5, Ta6 y Ta7) se localizan sobre cuencas de arroyos que drenan al Río de la Plata (A° El Pescado, A° Buñirigo, A° Juan Blanco), y 2 en subcuencas de arroyos menores que drenan con dirección SE hacia el Río Samborombón (ver Fig. 2).

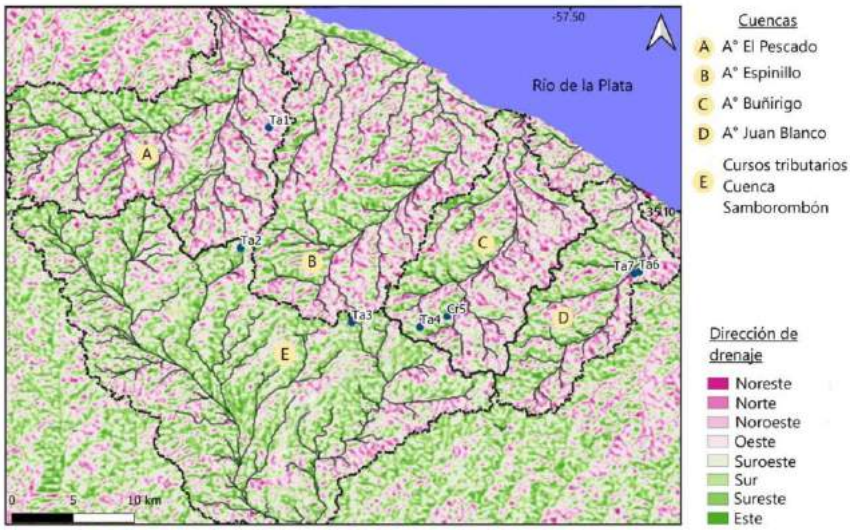


Figura 2. Delimitación de subcuencas de los principales cursos de la zona y sus sentidos de drenaje.

Respecto al clima, éste es húmedo con una precipitación media anual de 1082,6 mm, considerando el período 1986-2019 (ver Fig. 3). El balance hídrico anual (período 1986-2019) presenta excesos hídricos de febrero a noviembre y déficits en los meses de enero y diciembre (ver Fig. 3). Los valores máximos de precipitaciones medias mensuales ocurren en el mes de enero (media de 111,35 mm), mientras que los valores mínimos se dan en el mes de junio (media de 51,52 mm).

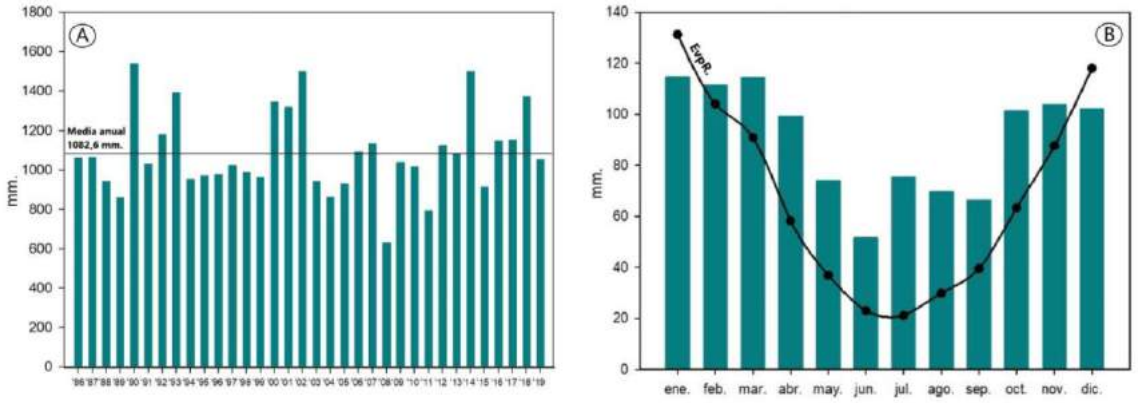


Figura 3. A) Precipitaciones totales anuales, B) Balance hídrico anual para el período 1986-2019.

El balance hídrico diario se realizó entre los meses de enero de 2019 y enero de 2020 (ver Fig. 4). Entre mayo y octubre hubo exceso de agua en el suelo, y las reservas fueron de 100 mm aproximadamente, con un descenso en la evapotranspiración. Estos valores justifican la elección del mes de mayo como inicio para la visita a los establecimientos, así como la toma de muestras. Luego, las reservas del acuífero comienzan a disminuir en el mes de noviembre y se agotan en diciembre. Por ello es que se eligió el mes de enero para un segundo muestreo por representar una época con un agotamiento de las reservas de agua en el suelo, debido a la alta tasa de evapotranspiración.

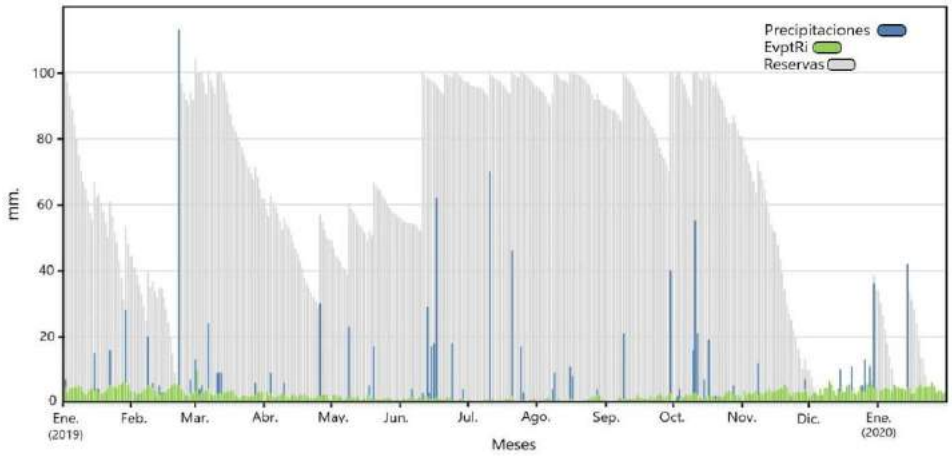


Figura 4. Balance hídrico diario para el período enero 2019-enero 2020.

Principales características de los predios relevados

Los establecimientos visitados poseen un total de 50 a 100 vacas con una producción diaria aproximada de 600 L de leche. Las instalaciones, en su mayoría, poseen el corral y sala de ordeñe con el piso cementado, cubriendo entre ambas unos 20 a 30 m^2.
Las construcciones de los pozos de captación presentan deficiencias en el aislamiento y en muchos casos son cercanos a pozos sépticos y/o a la zona de corrales y las instalaciones de ordeñe. En términos generales, las explotaciones con bombas sumergibles son las que se utilizan para el abastecimiento de las viviendas, limpieza del equipo de ordeñe y de las instalaciones del tambo. Las captaciones realizadas con molinos mayormente sólo se utilizan para el abrevado del ganado. En casi todos los casos se desconocían las características constructivas de las explotaciones, tales como profundidad, aislación y antigüedad, y al mismo tiempo los productores manifestaron desconocer el consumo diario de agua en los distintos establecimientos. Ninguno de los establecimientos relevados contaba con aislamiento superficial de la captación. En aquellas explotaciones en donde sí se conocían algunos detalles constructivos, como cementación y encamisado, no se tenía certeza de la profundidad de los mismos.

Hidroquímica del agua subterránea

Los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y en laboratorio indicaron que prácticamente no hubo variación entre ambos muestreos. Los resultados de todas las determinaciones realizadas en laboratorio se presentan en las Tablas I a y b.
Las muestras fueron clasificadas, según el diagrama de Piper, mayoritariamente como bicarbonatadas sódicas y sólo en un establecimiento como bicarbonatadas cálcicas (ver Fig. 5), sin registrar variación entre ambos muestreos.

Tabla I a. Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de iones mayoritarios. Muestreo mayo 2019. Temperatura (T) expresada en °C, CE en µS/cm, Dureza en mg/L y concentraciones en mg/L.

Muestra	pH	T	CE	Dureza	STD	$CO_3^{=}$	HCO_3^-	Cl^-	$SO_4^{=}$	NO_3^-	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+
Ta 1 a	7,80	18,4	696	149,2	479,2	0,0	562,7	0,69	4,9	22,9	30,3	17,7	149,0	7,7
Ta 1 b	7,47	20,4	528	237,8	483,1	0,0	562,7	39,4	6,8	52,6	48,8	27,8	109,0	7,7
Ta 1 c	7,80	18,4	830	127,1	459,4	57,4	296,9	19,5	5,3	22,4	21,7	17,5	113,0	7,8
Ta 2 a	7,27	18,4	528	437,7	348,5	0,0	491,6	68,3	6,1	51,9	44,9	100,2	3,0	18,0
Ta 2 c	7,31	18,4	830	419,1	547,8	0,0	494,9	70,9	5,9	50,7	40,8	99,6	6,0	19,0
Ta 2 b	7,54	18,4	699	323,8	461,4	0,0	438,2	50,3	6,4	25,9	29,6	80,2	30,0	13,0
Ta 3 c	7,97	18,2	740	110,9	488,4	48,1	363,7	25,5	4,9	15,3	19,7	14,8	145,0	8,0
Ta 3 b	7,52	18	469	232,8	309,5	32,8	192,4	5,1	3,9	5,2	43,2	29,9	8,0	11,0
Ta 4 a	7,66	18,4	706	194,1	465,9	0,0	343,7	67,4	5,9	16,2	46,4	18,7	79,0	10,0
Ta 4 b	7,48	18,4	761	188,9	502,3	38,3	258,1	60,2	6,1	15,2	45,8	17,8	95,0	12,0
Ta 4 c	8,60	20,1	768	183,2	506,9	40,5	362,6	62,3	4,9	15,1	37,0	21,7	98,0	13,0
Cr 5 a	7,61	20,4	1125	153,8	742,5	0,0	612,8	115,8	11,0	18,8	26,2	21,2	199,0	8,8
Ta 6a	7,84	18,4	1175	154,3	775,5	0,0	542,7	87,3	34,9	58,4	5,9	33,5	174,0	12,0
Ta 7 a	8,15	19,4	976	64,5	644,2	43,8	514,9	68,6	11,6	13,7	3,8	13,2	205,0	8,70
Ta 7 c	8,29	15,4	970	61,6	640,2	0,0	620,6	61,2	12,7	11,9	2,9	13,0	204,0	8,70

Tabla I b. Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de iones mayoritarios. Muestreo enero 2020. Temperatura (T) expresada en °C, CE en µS/cm, Dureza en mg/L y concentraciones en mg/L.

Muestra	pH	T	CE	Dureza	STD	$CO_3^{=}$	HCO_3^-	Cl^-	$SO_4^{=}$	NO_3^-	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+
Ta 1 a	7,63	17,5	656	151,7	432,9	0,0	591,7	0,8	3,9	25,80	25,3	21,3	136,0	7,1
Ta 1 b	7,43	17,5	732	201,8	483,1	0,0	552,7	31,5	2,6	55,85	34,8	27,6	117,0	6,8
Ta 1 c	8,21	16,5	677	147,6	446,8	105	379,3	16,2	2,0	23,74	19,6	23,7	130,0	7,0
Ta 2 a	7,22	17,8	783	357,9	516,8	0,0	423,7	65,1	2,9	52,74	53,9	53,6	22,4	11,0
Ta 2 c	7,40	19,5	783	390,0	516,8	0,0	401,5	63,6	5,0	46,86	72,9	49,9	23,1	17,0
Ta 2 b	7,49	18,5	658	286,8	434,3	24,1	394,8	50,7	3,5	29,05	62,8	31,2	35,0	15,0
Ta 3 a	7,88	20	687	99,2	462	48,1	501,6	22,1	2,8	14,09	3,7	21,6	156,0	8,8
Ta 3 b	7,51	18,2	445	248,9	293,7	31,7	339,2	4,4	1,8	5,95	46,0	32,2	11,0	8,0
Ta 3 c	7,76	18,7	700	117,8	453,4	48,1	500,5	22,3	2,4	14,52	19,9	16,3	129,0	9,2
Ta 4 a	8,55	21,3	729	172,9	481,5	0,0	483, 8	59,6	3,9	15,54	28,1	24,7	102,0	11,0
Ta 4 b	7,63	22,3	698	202,0	460,7	22,9	476	55,7	5,9	15,32	29,2	30,9	100,0	12,0
Ta 4 c	7,84	20,9	730	198,5	481,8	0,0	527,2	56,2	3,7	15,37	26,9	31,5	102,0	11,0
Ta 5 a	7,68	23	990	134,5	653,4	0,0	662,8	102,2	11,2	24,62	6,7	28,2	214,0	7,4
Ta 6 a	7,80	20,8	1115	242,5	735,9	0,0	771,8	87,6	11,4	66,05	22,5	44,8	195,0	8,0
Ta 7 a	8,10	19	909	72,8	599,9	37,2	578,3	65,5	6,4	13,33	7,3	13,1	213,0	8,0
Ta 7 c	8,45	22,7	879	73,5	580,5	48,1	536,1	65,3	34,7	12,43	6,7	13,6	213,0	7,8

 ISBN 978-987-1323-66-1

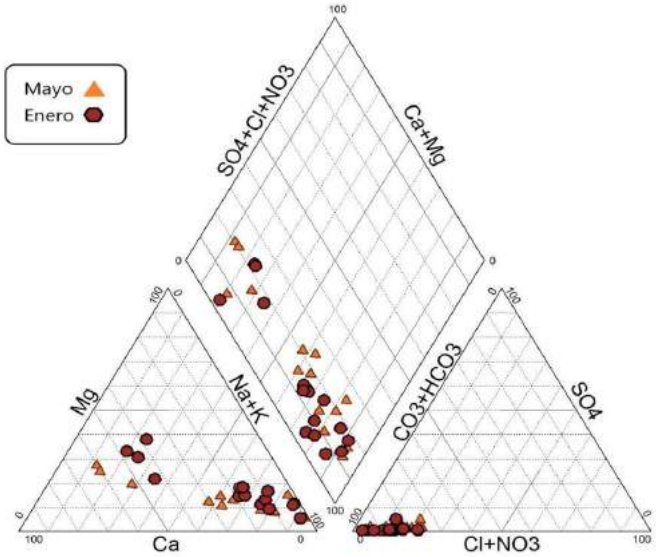


Figura 5. Clasificación de las muestras a partir del diagrama de Piper.

Los diagramas Stiff fueron montados sobre la imagen satelital del área de estudio con el objetivo de analizar si existía una relación entre la hidroquímica de las muestras y la geomorfología del área (ver Fig. 6).



Figura 6. Concentraciones de iones mayoritarios de los distintos establecimientos.

El agua de lluvia tiene la capacidad de disolver tanto el CO_2 de la atmósfera como el disponible en los poros de los sedimentos y suelos, generándose H_2CO_3 que acidifica el medio al disociarse parcialmente, provocando la disolución de los carbonatos presentes en sedimentos y suelos. Esta reacción conducirá a que el pH del agua del acuífero se torne cada vez más alcalino desde las zonas de recarga hacia las de descarga. Para la zona de estudio, el contenido de HCO_3^- muestra variabilidad en todo el rango de pH de las muestras, coincidente con el rango de dominio de esta especie.

Las concentraciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} superaron a las de Na^+ en 4 muestras por cada muestreo (Ta2a, b y c, y Ta3) (Tablas 1a y b). Esto podría deberse a que las muestras de

estos establecimientos se corresponderían con un área de recarga, y las restantes de descarga, donde estas características serían consistentes con un proceso de intercambio de Ca^{+2} por Na^{+} (Carol et.al., 2012). El Ca^{+2} se incorporaría al agua principalmente por la disolución de los carbonatos presentes en el sedimento loésico, siendo intercambiado por el Na^{+} presente en los sedimentos arcillosos del Postpampeano (suelos alcalinos) de las zonas de descarga.

Por su parte, las concentraciones de $SO_4^{=}$ y Cl^{-} en todos los pozos de explotación estuvieron por debajo del límite establecido por el CAA, de 400 mg/L para sulfatos y 350 mg/L para cloruros. Respecto de la calidad del agua para las producciones tamberas, y de acuerdo a la clasificación propuesta por Bavera (2011) donde se tiene en cuenta los contenidos de cloruros, sulfatos y magnesio, el agua de las perforaciones muestreadas no estaría aportando minerales a la dieta animal. Los contenidos de nitratos, sólo en tres de un total de siete establecimientos superaron el valor límite de 45 mg/L fijado por el CAA para el consumo humano (ver Fig. 7). El máximo valor determinado fue de 66 mg/L, considerando ambos muestreos. A su vez, teniendo en cuenta análisis realizados en el año 2017 en la cuenca del arroyo El Pescado (Delgado et al., 2020a) el valor medio reportado de NO_3^{-} para el agua subterránea extraída de perforaciones particulares fue de 24 mg/L.

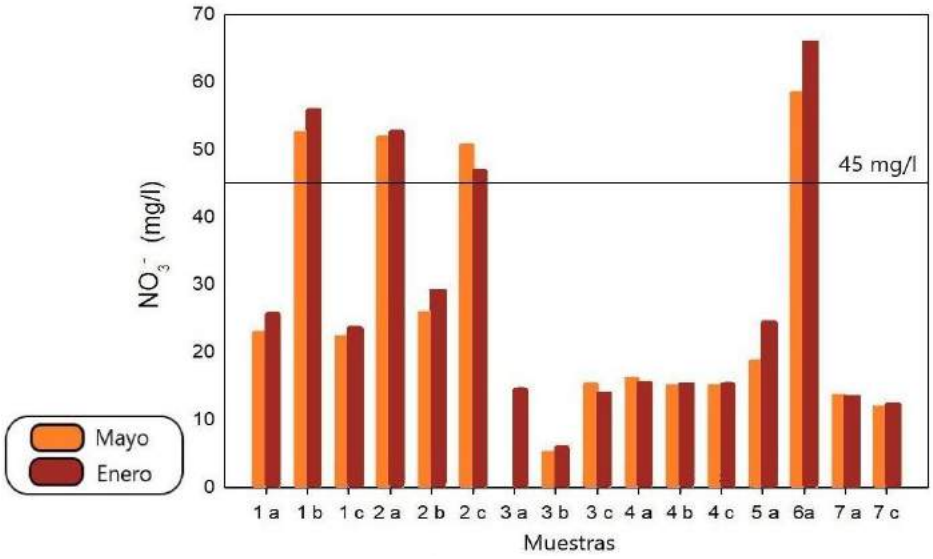


Figura 7. Concentraciones de NO_3^{-} en las distintas explotaciones de los establecimientos muestreados. La línea de 45 mg/L corresponde al límite de concentración de NO_3^{-} establecido por el CAA.

Los valores de dureza y CE se encuentran dentro del rango determinado por Delgado et al. (2020 b) en la cuenca del arroyo El Pescado, a excepción de las muestras provenientes del sitio Ta2, en las cuales para el mes de mayo la dureza excede lo establecido en dicho estudio. Por su parte los valores de pH establecidos en este trabajo, en general, son menores que en el mencionado estudio. En coincidencia con estudios regionales (Herrero et al., 2002), se pudo observar que en la mayor parte de los casos los pozos eran utilizados para fines diversos, actividad productiva y consumo humano. En particular, la composición mineral del agua de bebida animal, además de influir sobre la ingesta de agua, condiciona los niveles productivos que puedan ser alcanzados (Fernández Cirelli, 2010). Por esta razón, es de gran relevancia poder establecer las características químicas del agua extraída.

CONCLUSIONES

Se concluye que, para el sector estudiado del partido de Magdalena, en la mayor parte de los establecimientos visitados, según los resultados físico-químicos de las captaciones analizadas, éstas no representarían un riesgo para la vida humana ni animal, de acuerdo a la normativa nacional vigente. A su vez, los valores encontrados se encuentran en sintonía con estudios previos de mayor escala, así como los realizados a mayor destalle en distintas cuencas del Partido.

De todos modos, se considera pertinente mencionar que sería recomendable poder realizar en un futuro determinaciones microbiológicas, ya que se detectaron condiciones no óptimas en algunos predios (proximidad entre la fuente de provisión y el pozo séptico o el tambo, desconocimiento sobre la existencia o característica del encamisado, encharcamiento en la boca de la explotación, entre otros). Estas características podrían representar una fuente de contaminación por microorganismos, representando consecuencias negativas tanto para el consumo directo como bebida para el ser humano o el ganado, así como para distintas instancias implicadas a lo largo del proceso productivo en el tambo.

REFERENCIAS

Appelo, C. A. J., and Postma, D. *Geoquímica. Aguas subterráneas y contaminación*, 536 (2005).

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, & Water Environment Federation *Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 2)*. American Public Health Association. (1915).

Atkinson, D., & Watson, C. A. The environmental impact of intensive systems of animal production in the lowlands. *Animal Science*, 63(3), 353-361 (1996).

Auge, M. P. Investigación hidrogeológica de La Plata y alrededores (Doctoral dissertation, *Tesis Doctoral Universidad de Buenos Aires*. 2 T: 1-171 (1997).

Auge, M., Hirata, R., & Vera, F. L. Vulnerabilidad a la contaminación por nitratos del acuífero puelche en La Plata, Argentina. 187 p. *Informes del Centro de Estudios de América Latina (CEAL)* (2004).

Auge, M. P. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. In *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 293-311). La Plata: Quick Press (2005).

Bavera, G. Aguas y aguadas para el ganado. *El agua subterránea. Imberti-Bavera: Río Cuarto*. Argentina, 43-54 (2011).

Bilenca, D., Codesido, M., González Fischer, C., Pérez Carusi, L., Zufiaurre, E. & Abba, A.M. Impactos de la transformación agropecuaria sobre la biodiversidad en la provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, Nueva Serie, 14 (2012).

Carol, E. S., Kruse, E. E., Laurencena, P. C., Rojo, A., & Deluchi, M. H. Ionic exchange in groundwater hydrochemical evolution. Study case: the drainage basin of El Pescado creek (Buenos Aires province, Argentina*). Environmental Earth Sciences*, 65(2), 421428 (2012).

Cavallotto, J. Evolución geomorfológica de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata. *Unpublished doctoral dissertation*. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, La Plata (1995).

Clark, I. *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC Press (2015).

Argentino, C. A. Capítulo XII, *Artículos: 982 al 1079-Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas* (2012).

Código Alimentario Argentino. Capítulo XII, *Artículos: 982 al 1079-Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas* (2012).

Custodio, E., & Llamas, M. R. *Hidrología subterránea*, 2ª edición. Tomo I y II, Ediciones Omega, Barcelona, 2350 (1996).

Delgado, M. I., Carol, E., Mac Donagh, M. E. & Casco, M. A. Chemical variation of surface water and groundwater in relation to water balance in the watershed of El Pescado Creek (Central‑Eastern Argentina). *Environmental Earth Sciences*, 79:399. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09143-8 (2020 a).

Delgado, M. I., Carol, E., Di Lello, C. & Mac Donagh, M. E. Distribución y concentración de elementos traza en aguas superficiales y subterráneas del arroyo El Pescado, Argentina. *Revista del Museo de La Plata 5(2)*, 454-466. https://doi.org/10.24215/25456377e118 (2020 b).

Fernández Cirelli, A., Schenone, N., Pérez Carrera, A., Volpedo, A. Calidad de agua para la producción de especies animales tradicionales y no tradicionales en Argentina. *AUGMDOMUS*,1, 45-66 (2010).

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S.,
Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N. & Snyder, P. K. Consecuencias globales del uso de la tierra. *Science*, 309 (5734), 570-574 (2005).

Frenguelli, J. *Rasgos generales de la hidrografía de la provincia de Buenos Aires.* Provincia de Buenos Aires, Ministerio de Obras Públicas, Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas (1956).

Fucks, E., D´amico, G., Pisano, F. & Nuccetelli, G. Evolución geomorfológica de la región del Gran La Plata y su relación con eventos catastróficos. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 74(2), 141-154 (2017).

García, A. R., Maisonnave, R., Massobrio, M. J., & Fabrizio de Iorio, A. R. Field Scale Evaluation of Water Fluxes and Manure Solution Leaching in Feedlot Pen Soils. *Journal of environmental quality*, 41(5), 1591-1599 (2012).

Hem, J.D. *Estudio e interpretación de las características químicas del agua natural* (Vol. 2254). Departamento del Interior, Servicio Geológico de Estados Unidos (1985).

Herrero, M. A., Iramain, M. S., Korol, S., Buffoni, H., Flores, M., & Fortunato, M. Calidad de agua y contaminación en tambos de la cuenca lechera de Abasto Sur, Buenos Aires (Argentina). *Rev. Arg. De Prod. Anim*, 22(1), 61-70 (2002).

Herrero, M. A. & Gil, S. B. Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología austral*, 18 (3), 273-289 (2008).

Herrero, M. A. & Thiel, I. M. E. *Contaminación del agua de los sistemas de producción rural. Interacciones del agua con la energía, el medio ambiente, la alimentación y la agricultura*, Volumen I, 168 (2009).

Melo, M. Geohidrología de la planicie costera del Río de la Plata medio, Partido de Magdalena. *Tesis de doctorado*. Facultad de Ciencias naturales y Museo, UNLP (2019).

Montico, S. El manejo del agua en el sector rural de la región Pampeana argentina. *Theomai*, (99), 0 (2004).

Morse, D. Environmental considerations of liverstock producers. *Journal of animal science*, 73(9), 2733-2740 (1995).

Piper, A. M. Un procedimiento gráfico en la interpretación geoquímica de análisis de agua. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25 (6), 914-928 (1944).

Ramilo, D., & Prividera, G. *La agricultura familiar en Argentina. Diferentes abordajes para su estudio. Buenos Aires, Argentina*, Ed. INTA (2013).

Simler, R. *DIAGRAMMES: Logiciel d'hydrochimie multilangage en distribution libre*. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, France. http://www.lha.univavignon.fr/LHA-Logiciels.htm (2009). .

SMN, Servicio Meteorológico Nacional. Datos diarios de precipitación y temperatura correspondientes a la estación La Plata Aero (período 1986-2020). Expediente 181.551 (2020).

Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in *Climatology* 10, 185-311 (1957).
Viglizzo, E. F., & Frank, F. C. Erosión del suelo y contaminación del ambiente. *Expansión de la Frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico ambiental*, 37-43 (2010).
Zaniboni, C. M., & Villegas, I. A. G. Uso del suelo en el territorio agrícola ganadero del Oeste bonaerense. *Memoria Técnica*, 2012, 200-206 (2011).

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL PLATA

Muiños Machado G.[a] y Doyle M. E.[ab]

[a]*Centro de investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA, UMIIFAECI, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: gabriela.machado@cima.fcen.uba.ar

RESUMEN

Varias regiones del planeta están sufriendo cambios de uso del suelo, mayoritariamente de origen antropogénico. La Cuenca del Plata es un ejemplo de ello, principalmente debido a la expansión de la frontera agrícola. Estos cambios de uso del suelo tienen diversas consecuencias para el medio: pérdida de diversidad, fragmentación de los ecosistemas, mayor vulnerabilidad del suelo frente a la erosión, modificación de las variables climáticas locales, como temperatura y humedad, entre otras. El objetivo de este trabajo es analizar los cambios de uso del suelo producidos en las últimas décadas en la Cuenca del Plata. Para ello se realizó una clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat utilizando el método de máxima verosimilitud. Se realizó el análisis para el mes de Septiembre de los años 1986, 1999 y 2011. Se eligió el mes de Septiembre de esos años para realizar el análisis debido a una mayor disponibilidad de imágenes satelitales sin cobertura nubosa para el área de estudio. Posteriormente se analizaron los cambios producidos entre las diferentes fechas de análisis. Los resultados muestran un incremento de la superficie dedicada a cultivos a expensas de la pérdida de vegetación natural. Estos cambios son de mayor envergadura en ciertas regiones de la cuenca, como la región norte. Con los resultados obtenidos en este trabajo se quiere analizar el efecto de los cambios de uso del suelo sobre las tormentas e inundaciones en diferentes áreas de la Cuenca del Plata.

Palabras Clave: Cambio de usos del suelo, clasificación supervisada, imágenes satelitales, Cuenca del Plata.

INTRODUCCIÓN

La deforestación debido a la expansión de la agricultura y la ganadería es uno de los principales cambios de uso del suelo de origen antrópico que se registraron en las últimas décadas.

Estos cambios afectan al medio ambiente de diferentes formas. Como el clima y la vegetación están en equilibrio dinámico debido a sus influencias recíprocas, los cambios de uso del suelo de medio y gran tamaño pueden afectar el clima local, regional y global (Nosetto et al, 2005). También se ve alterado el ciclo hidrológico al modificarse las tasas de infiltración y de evapotranspiración (Figueroa-Jáuregui et al, 2010). Esta última es responsable de más de la mitad de la precipitación continental (Nosetto et al, 2005), y su alteración afecta al clima, modificando la capa límite planetaria y los patrones de circulación de mesoescala. Por otro lado, como los árboles tienen mayor profundidad radicular que la vegetación de menor tamaño, como los pastos y los cultivos (Bracalenti

et al, 2017), tienen un mayor acceso al agua presente en el suelo, la cual hace que una mayor cantidad de esta agua sea evapotranspirada hacia la atmósfera.
Asimismo, se ha mostrado que la deforestación altera diversos ciclos naturales. Entre ellos, los ciclos biogeoquímicos, sobre todo el del carbono, debido a la modificación de la tasa de asimilación de CO_2 por el cambio de la vegetación. De forma similar también se ve alterado el balance de energía (Islam et al, 2018), principalmente por la modificación de la evapotranspiración.
Por otro lado, se ven afectados los ecosistemas y su diversidad (Alperín et al, 2002), ya sea por la eliminación de la vegetación natural o por la fragmentación de los ecosistemas. Esto es especialmente importante si se ven alterados ecosistemas ricos en biodiversidad o que sean el hábitat de especies endémicas y/o en peligro de extinción.
Otro elemento que se ve afectado por el proceso de deforestación es el suelo. En las áreas donde los bosques son reemplazados por cultivos, los suelos serán más vulnerables frente a la erosión debido a la disminución de la cantidad y tamaño de las raíces de la vegetación, las cuales sirven como protección frente a la erosión. Por otro lado, la reducción de la profundidad radicular antes mencionada facilita la saturación del suelo, aumentando el escurrimiento superficial y, consecuentemente, la erosión (Bracalenti et al, 2017). Además, las zonas de cultivos suelen tener un periodo donde el suelo permanece desnudo, siendo mucho más vulnerable a los principales agentes erosivos, como el viento y el agua.
En muchos casos estos impactos generan cambios que afectan a los humanos (Islam et al, 2018). Por un lado, puede verse afectada la disponibilidad de los recursos naturales, lo cual puede afectar la actividad económica. Por otro lado, los cambios de uso del suelo pueden incrementar el riesgo ante diversos eventos naturales como las precipitaciones intensas y los eventos de inundación o los deslizamientos de tierra, entre otros. Estos impactos, a su vez, se pueden ver incrementados por el cambio climático (Islam et al, 2018).
Por todo ello, el análisis de los usos del suelo actuales, así como su variación en el tiempo, es importante para entender los problemas generados, así como para buscar posibles soluciones para los mismos (Abd El-Kawy et al, 2011). Las imágenes satelitales son una valiosa fuente de información para monitorear y estudiar los cambios producidos en los usos de los suelos dado que permiten adquirir en forma regular y frecuente información detallada para amplias regiones en todas partes del mundo. Asimismo, su formato digital facilita su procesamiento y lo convierte en una de las herramientas más utilizadas mundialmente (Alperín et al, 2002, Brannstrom et al, 2008, De Alban et al, 2018).
A pesar de su importancia, hay regiones del planeta para las cuales son escasos los estudios sobre los cambios de uso del suelo y sus efectos. Entre estas regiones se encuentra Suramérica, región que sufrió grandes cambios pero que fue poco estudiada (Bracalenti et al, 2017). El Cerrado brasileño es un ecosistema de sabana tropical que representa el mayor ecosistema de pastizales y arbustos tropicales a nivel global (Brannstrom et al, 2008). Se le estima una extensión aproximada de 2 millones de kilómetros cuadrados (Machado et al, 2004), cubriendo un 22% del territorio brasileño (Jepson W., 2005). Además, estudios de biodiversidad clasificaron el Cerrado como "hotspot", es decir, un área muy rica en biodiversidad, incluyendo especies endémicas tanto animales como vegetales. Esta región sufrió importantes cambios de uso del suelo en las últimas décadas a causa de la expansión de la agricultura, sobre todo de la soja, ya que Brasil es uno de los principales productores y exportadores a nivel mundial de

este producto (Brannstrom et al, 2008). Se estima que solo un 35% del Cerrado está en un estado relativamente natural, mientras que otros estudios menos optimistas estiman que solo el 20% de su superficie permanece con su vegetación nativa (Jepson 2005). A pesar de su importancia ecológica y los grandes cambios sufridos, son pocos los estudios realizados y estos arrojaron resultados diversos, ya que la estimación de la superficie afectada varía entre un 40% y un 80%.
La Cuenca del Plata es otra de las áreas de Suramérica que sufrió grandes cambios en las últimas décadas debido principalmente a la expansión de la frontera agrícola.
En el presente trabajo se busca analizar los cambios de uso del suelo que sufrió la Cuenca del Plata en el período 1986-2011 a partir de la clasificación de imágenes satelitales, enfocado en la expansión de la agricultura a expensas de la vegetación natural. Este trabajo se incluye en uno mayor en el que se quiere investigar el efecto de estos cambios sobre los eventos de precipitación extensa y las inundaciones en diferentes puntos de la cuenca.

MÉTODOS

Área de estudio



Figura 1. Cuenca del Plata. El cuadrado rojo marca la región analizada en el presente trabajo

La Cuenca del Plata está ubicada en el Sur de Sur América, entre las coordenadas 14ºS y 38ºS y 67ºW y 43ºW. Es la segunda cuenca más grande de Sudamérica y la quinta del mundo. Tiene una extensión aproximadamente de 3100000 km^2, repartida en cinco países: Argentina, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay. En ella se genera una gran parte de la electricidad, alimento y exportaciones de estos países.
Tiene tres tributarios principales: el Paraguay, el Paraná y el Uruguay. El caudal medio de la cuenca es de 23000m^3.

El análisis del presente trabajo se centrará en un área de ~110000 km^2 ubicada en el límite norte de la cuenca, la cual se encuentra marcada con un cuadrado rojo en la Figura 1. Debido a que el área seleccionada se encuentra ubicada en el límite norte de la cuenca los mapas tienen una forma irregular, siguiendo el contorno de la cuenca. La superficie de esta zona está repartida entre tres estados brasileños: Mato Grosso, Mato Grosso do Sul y Goiás. La vegetación natural dominante de la zona es el Cerrado y es una de las áreas de la cuenca que sufrió alteraciones del uso del suelo en las últimas décadas debido a la expansión de la agricultura.

Selección de imágenes

Se realizó un revelamiento de las imágenes Landsat 5 TM disponibles para la superficie completa de la Cuenca del Plata considerando que estas no tuvieran nubes y no presentasen fallas. Se eligió trabajar con las imágenes Landsat 5 TM debido a su resolución espacial (30m en todas las bandas salvo en el infrarrojo térmico, donde es de 120m) y al período de tiempo para el cual hay imágenes (1984-2011), además de que las imágenes de este satélite fueron utilizadas en numerosos estudios similares (Abd El-Kawy et al, 2011, Brannstrom et al, 2008, Figueroa-Jáuregui et al, 2010). Estas se obtuvieron del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) a través de la herramienta Glovis.

Una vez realizado esto, se decidió utilizar las imágenes para el mes de septiembre de los años 1986, 1999 y 2011 ya que son años casi equidistantes para los cuales existe imágenes Landsat que cumplen las condiciones antes mencionadas para casi toda la superficie de estudio.

En los casos en que las imágenes no están disponibles, presentan algún fallo o hay presencia de nubes, se eligió la imagen temporalmente más próxima a la fecha seleccionada.

Corrección de las imágenes

Las imágenes obtenidas del USGS están georreferenciadas (Hansen M. C. and Loveland T. R., 2012), pero para poder realizar la clasificación de usos de suelo es necesario pasar los valores de números digitales (ND) a radiancia y realizar la corrección atmosférica.

La corrección atmosférica busca eliminar el efecto de los componentes atmosféricos sobre la radiación. Fue realizada mediante la herramienta FLAASH Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del software ENVI (Environment for Visualizing Images).

Clasificación de las imágenes

Se realizó una clasificación supervisada de las imágenes satelitales mediante la técnica de máxima verosimilitud. Esta es una de las técnicas de clasificación más utilizadas (Abd El-Kawy et al, 2011, Figueroa-Jáuregui et al, 2010, Islam et al, 2018, Machado et al, 2004). Para ello se definieron regiones de interés (Roi) para cada una de las clases establecidas. Se establecieron las diferentes clases: bosque, cultivos, matorral, urbano, agua, suelo desnudo o con vegetación poco densa.

Tras la clasificación se realizó una limpieza de las imágenes para evitar los pixeles aislados o regiones muy pequeñas aisladas y se realizó la combinación de las clases, dejando finalmente 4 clases: cultivo, agua, urbano y natural. En esta última clase se engloban los bosques, matorrales y las regiones de suelo desnudo o vegetación poco densa.

Análisis de cambios

Para analizar los cambios de uso de suelo se realizó una comparación entre los diferentes mapas de uso de suelo obtenidos a partir de la clasificación de las imágenes para así detectar las áreas que sufrieron cambios. Esto se analizó mediante la herramienta de cambio de cobertura del suelo del software Qgis. Así se obtuvo un mapa donde se ven reflejadas las áreas que sufrieron modificaciones para cada uno de los periodos (1986-1999, 1999-2011 y 1986-2011) y una matriz de cambio, la cual indica información detallada sobre los cambios (Jepson, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

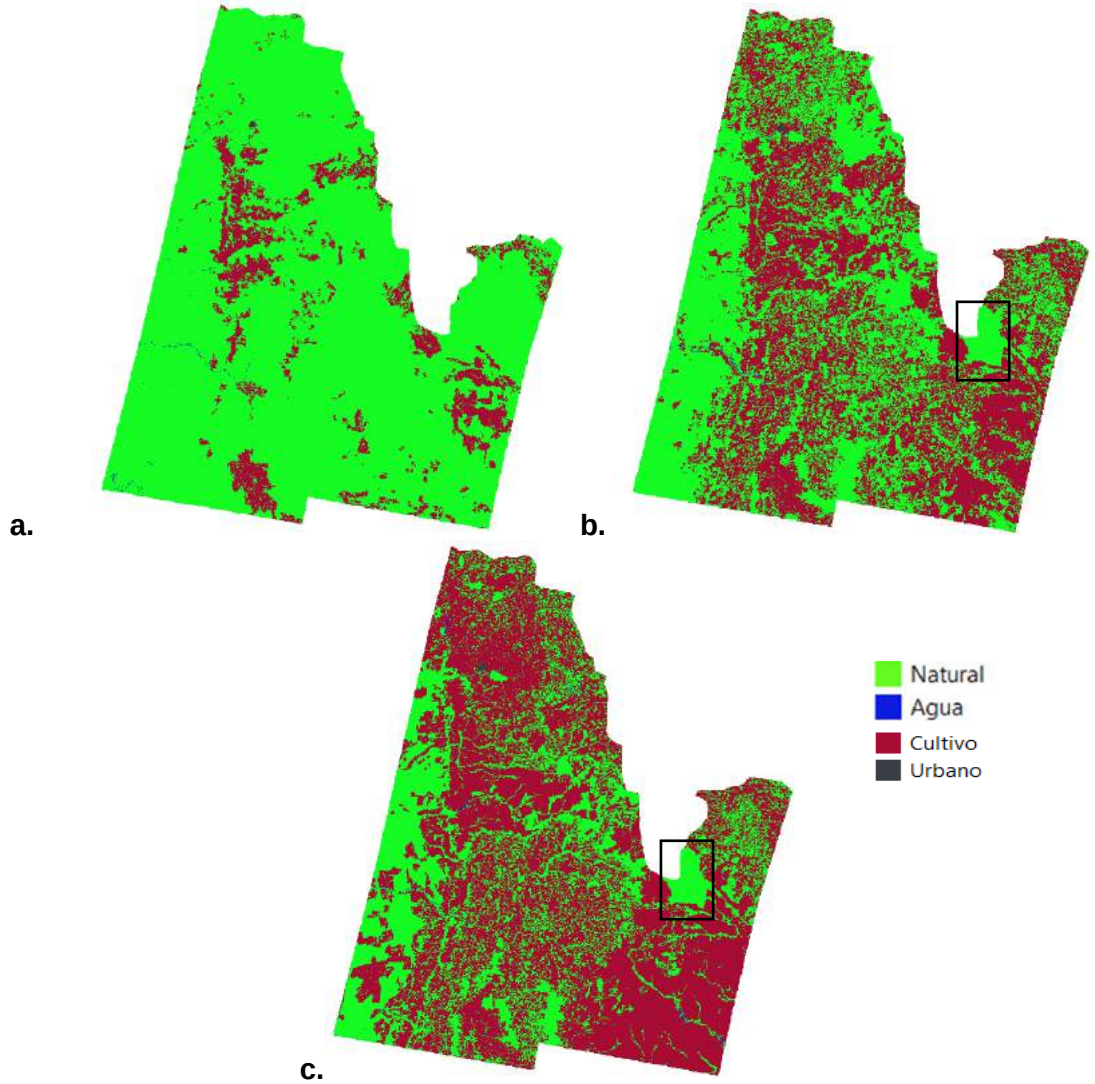


Figura 2. Mapa de cultivos para la zona de estudio obtenidos a partir de la clasificación supervisada. **a.** 1986. **b.** 1999. **c.** 2011

La clasificación de las imágenes satelitales muestra un incremento de la superficie dedicada a cultivo para los dos periodos analizados (Ver Fig. 2), siendo este mayor en el periodo 1986-1999, donde la superficie cultivada pasa del ~11% al ~46,5%, lo que supuso un incremento de ~3.890.000 ha. En el periodo 1999-2011 el aumento de superficie dedicada al cultivo fue menor, pasando de ~46,5% a ~62.45%, lo que supuso

un aumento de ~1.760.000 ha (Tabla I). La extensión de la agricultura se da por toda el área de estudio, siendo el sudoeste de la región de interés la que se ha visto menos afectada. Esto puede deberse a su cercanía al Pantanal, una de las principales llanuras aluviales a nivel mundial donde se incluye el mayor humedal del mundo.
Situación similar sucede en un área del noreste señalada en la Figura 2b y 2c, la cual permanece libre de agricultura mientras el área circundante se transforma con el paso del tiempo hasta estar dominada por la agricultura en el año 2011. Esto se debe a que dicha región pertenece al Parque Nacional das Emas, el cual es Patrimonio de la Humanidad.
Estudios previos realizados en una región del estado de Mato Grosso próxima a nuestra área de estudio revelaron que la superficie de Cerrado pasó de 66% en 1986 a 52% en 2002 (Brannstrom et al, 2008). Aunque nuestros resultados muestran un porcentaje mayor, sobre todo en el año 1986, no todo lo que reportamos como natural seria cerrado, por lo que no se contradicen los resultados.
Durante el periodo 1986-1999 la tasa de incremento de la superficie dedicada al cultivo es de ~300000Ha/año (2.73%/año), mientras que en el siguiente periodo es menos de la mitad, ~147000Ha/año (1.33%/año). Brannstrom et al, (2008) obtuvieron una tasa de reducción de la superficie del Cerrado en el estado de Mato Grosso de ~1.3% para el periodo 1986-2002, similar a la obtenida para nuestra región de estudio. Según su trabajo, en 1986, un cuarto de la superficie de este Mato Grosso era agropastoril, y esta se expandió hasta cerca del 47% en 2002.
Para el análisis de los cambios producidos en los diferentes periodos se consideraron las siguientes categorías: aforestación, que será cuando un área pase de cultivo a natural; desforestación, que es el caso contrario, cuando pasa de natural a cultivo; expansión urbana, como el paso de natural o cultivo a urbano; y agua, que indicará las zonas donde en uno de los mapas los pixeles fueron clasificados como agua y en el otro no. Hay que tener en cuenta que estos cambios reflejados en los resultados no responden exclusivamente a cambios en sí, sino que también pueden responder a posibles errores del proceso de análisis.

Tabla I: Expansión de la agricultura para los tres años de estudio.

	Porcentaje cultivo	**Aumento (%)**	**Área (Ha)**	**Aumento (Ha)**	**Porcentaje natural**	**Área (Ha)**
1986	10,91		1.225.819		88,96	9998884
1999	46,45	35,54	5.118.443	3.892.624	53,41	5885219
2.011	62,45	16,01	6.880.712	1.762.269	37,31	4110753

En el mapa de cambio de uso del suelo entre 1986 y 1999 (Ver Figura 3) se puede ver como se produjo una deforestación intensa en toda el área de estudio, implicando que mas de 4 millones de hectáreas pasaron de estado natural a cultivos (Tabla II). En esta región de Brasil la ocupación del terreno fue antes que en otras regiones y estuvo impulsada por la implantación de pastos para la alimentación del ganado (Machado et al, 2004). Para el mismo periodo de tiempo, Jepson (2005) encontró que en una región del este de Mato Grosso se produjo una reducción del Cerrado del ~70%, lo que supuso una tasa anual de pérdida de 5.39%, lo que supone el doble de rápido que la observada en el presente trabajo.

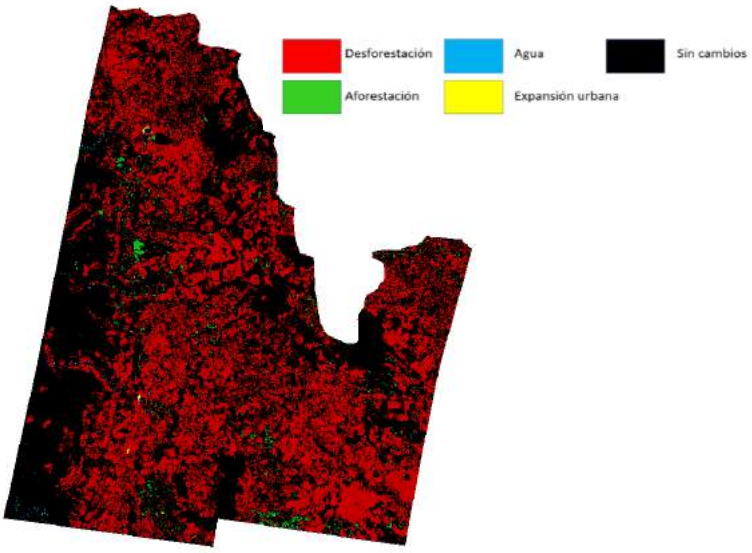


Figura 3. Mapa de cambios de uso del suelo en el periodo 1986-1999.

Los resultados muestran que un área de ~100000ha pasó de ser clasificada como cultivo en 1986 a natural en 1999. Estudios previos encontraron que la regeneración de Cerrado para este periodo de tiempo fue equivalente a la mitad de la superficie que pasó de Cerrado a cultivo durante el mismo periodo (Jepson, 2005). En el caso presente, los resultados obtenidos para la regeneración del Cerrado son menores.
Esta región se vio afectada por la expansión urbana, que sufrió un incremento de ~3800 hectáreas entre 1986 y 1999.

Tabla II: Cambios de uso del suelo para el periodo 1986-1999.

Categoría	1986	1999	Nº Pixeles	Hectáreas
Aforestación	Cultivo	Natural	1129908	101692
Desforestación	Natural	Cultivo	45487110	4093840
Expansión urbana	Cultivo	Urbano	12954	1166
	Natural	Urbano	29275	2635
Agua	Natural	Agua	61446	5530
	Agua	Natural	84522	7607

En cuanto a las diferencias en la clasificación de las masas de agua, esta diferencia responde principalmente a inconvenientes de la metodología que a cambios en su extensión.
Si vemos los cambios de uso del suelo que se produjeron en la región de estudio en el periodo 1999-2011 (Ver Fig. 4), resalta la superficie catalogada como aforestación, es decir, que paso de cultivo a natural, la cual es de ~395000 hectáreas (Tabla III). Esta se sitúa predominantemente en una la zona centro-oeste del área de estudio. Esa región presenta una amplia distribución de superficie agrícola con parches en estado natural, así que es probable que una parte de esta superficie responda a errores propios de la metodología y del filtrado de los resultados más que a cambios propios del medio.
En cuanto a la expansión de la agricultura, el análisis de los cambios de uso del suelo muestra que un total de 2158709 hectáreas pasaron de estado natural a superficie agrícola en el periodo 1999-2011.

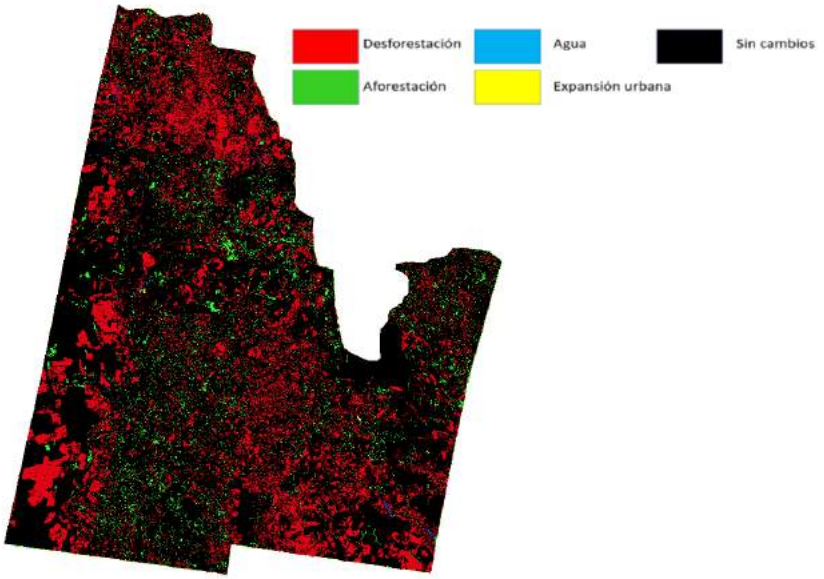


Figura 4. Mapa de cambios de uso del suelo en el periodo 1999-2011.

Tabla III: Cambios de uso del suelo para el periodo 1999-2011.

Categoría	1999	2011	N.º Pixeles	Hectáreas
Aforestación	Cultivo	Natural	4388446	394960
Desforestación	Natural	Cultivo	23985653	2158709
Expansión urbana	Cultivo	Urbano	26008	2341
	Natural	Urbano	4646	418
Agua	Natural	Agua	127793	11501
	Agua	Natural	41519	3737

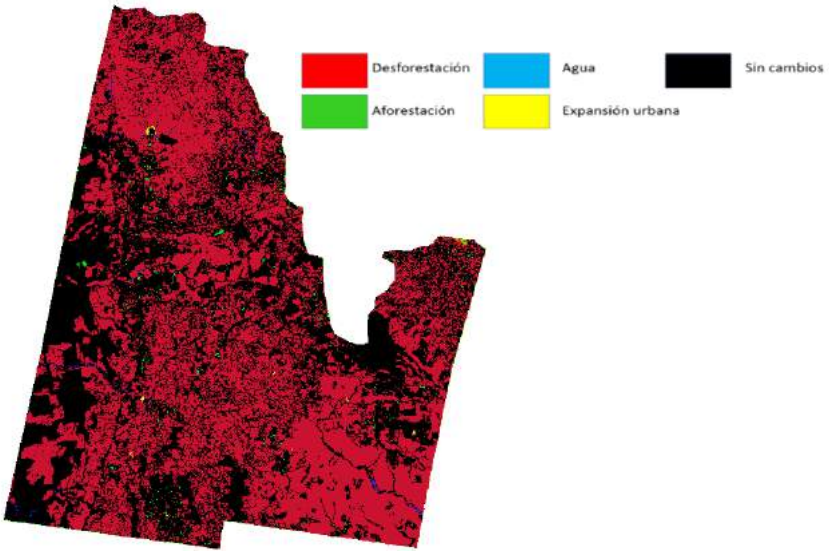


Figura 5. Mapa de cambios de uso del suelo en el periodo 1986-2011.

La superficie urbana se vio ampliada en ~2700 hectáreas, la mayoría precedente de la clase cultivo en 1999.
Por último, en la Tabla IV se presenta los cambios producidos en todo el periodo de análisis (1986-2011).
Se puede ver como se ve reducida gran parte de la superficie que en el periodo 1999-2011 fue clasificada como aforestación (Ver Fig. 5). Esto puede responder a dos motivos: que sean pixeles que fueran clasificados erróneamente en el mapa de 1999 o que esa superficie fuera dedicada a cultivo durante un periodo de tiempo y luego volviera al estado natural.
Un total de ~5846000 hectáreas que en 1986 estaban en estado natural en 2011 son dedicadas al cultivo, lo que supone que cerca de la mitad del área de estudio sufrió este cambio.
El aumento de la superficie urbana fue de ~5800 hectáreas, algo menor que la que se obtiene al sumar la de los dos periodos por separado.
De continuar la destrucción del Cerrado a tasas similares a las obtenidas para las últimas décadas, se estima que este ecosistema desaparecerá para el año 2030 (Machado et al, 2004). Por ello es importante establecer mejores medidas para la conservación de este ecosistema.

Tabla IV: Cambios de uso del suelo para el periodo 1986-2011

Categoría	1986	2011	N.º Pixeles	Hectáreas
Aforestación	Cultivo	Natural	607369	54663
Desforestación	Natural	Cultivo	64953339	5845801
Expansión urbana	Cultivo	Urbano	21093	1898
	Natural	Urbano	43241	3892
Agua	Natural	Agua	152585	13733
	Agua	Natural	87824	7904

CONCLUSIONES

El área de estudio del presente trabajo es una región que sufrió una fuerte alteración del uso del suelo en las últimas décadas debido principalmente a la expansión de la agricultura. Aproximadamente la mitad de la superficie analizada dejó de albergar vegetación natural para ser utilizada como superficie agrícola, principalmente debido a la expansión del cultivo de soja, entre otros. De continuar la pérdida de superficie de Cerrado al mismo ritmo que las últimas décadas, su proyección a futuro no es nada buena. Por ello es necesario implementar medidas de protección como el establecimiento de áreas protegidas.
De forma similar, muchas otras áreas de la Cuenca del Plata sufrieron una transformación similar, por lo que es necesario su análisis, así como estudiar los efectos que estos cambios tienen las diferentes variables ambientales.

REFERENCIAS

Abd El-Kawy, O. R., Rod J. K., Ismail H. A. and Suliman A. S. Land use and land cover change detection in the western Nile delta of Egypt using remote sensing data. *Applied Geography* 31, 483-494 (2011).

Alperín, M. I., Borges, V. G. and Sarandón, R. Caracterización espacial de los tipos de cobertura de suelo usando técnicas geoestadísticas a partir de información satelital. *Revista de la Facultad de Agronomía* 105, 40-51 (2002).

Bracalenti, A., Müller, O. and Berbery, E. Efectos remotos del cambio de uso del suelo en el clima del sudeste de Sudamérica. *XXVIII Reunión científica de la asociación argentina de geofísicos y geodesta.* (2017)

Brannstrom, C., Jepson, W., Filippi, A. M., Redo, D., Zengwang, X. and Ganesh, S. Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986-2002: Comparative análisis and implications for land-use policy. *Land Use Policy* 25, 579-595 (2008).

De Alban, J.D.T., Connette, G.M., Oswald, P. and Webb, E.L. Combined Landsat and L-Band SAR Data Improves Land Cover Classidication and Change Detection in Dynamic Tropical Landscapes. *Remote Sensing* 10, 306-334 (2018).

Figueroa-Jáuregui, M. L., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, J. L. and Vázquez-Peña, M. Land use change in San Cristóbal de las Casas Watershed, México. *Agrociencia* 45, 531–544 (2010).

Hansen, C. H., and Loveland, T. R. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing Environment* 122, 66-74 (2012).

Islam, K., Jashimuddin M., Nath, B. and Nath, T.K. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 21, 37-47 (2018).

Jepson, W. A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in the Brazilian savanna. *The Geographical Journal* 171, 99-111 (2005).

Machado, R.B., Ramos Neto, M.B., Pereira, P.G.p., Caldas, E.F., Gonçalves, D.A., Santos, N.S., Tabor, K. and Steininger, M. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. *Conservaçao Internacional, Brasilia, DF.* (2004)

Nosetto, M.D., Jobbágy, G. E. and Paruelo, J. M. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11, 1101-1117 (2005).

EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES EN LA BARDA DEL ÑIRECO

Müller M.[a], Zárate A.[b] y Espert N.[c]

[a, b y c]*Universidad Nacional de Río Negro, Bariloche, ARGENTINA*

e-mail: mbelenmuller@gmail.com

RESUMEN

El desarrollo urbano sin un ordenamiento territorial adecuado que facilite el uso de los distintos suelos de acuerdo a sus aptitudes, supone un gran número de adversidades. Esto es lo que ha afectado a San Carlos de Bariloche, donde en las últimas décadas se ha experimentado una acelerada y sostenida tasa de ocupación de tierras. En el presente trabajo se tuvo como objetivo la descripción del riesgo ambiental presente en la denominada barda del Ñireco y la llanura aluvial del arroyo homónimo. Dicha barda se encuentra ubicada en la zona este del casco urbano de la ciudad y del arroyo, el cual desemboca en el lago Nahuel Huapi. Ésta, además de no poseer un ordenamiento territorial adecuado, presenta características ambientales que la posicionan de forma desfavorable frente a la urbanización. La zona de estudio posee una densidad poblacional que varía de alta a muy alta, con un 90% del suelo ocupado por infraestructura permanente, principalmente residencias sociales. Para cumplir el objetivo se realizó una caracterización ambiental teniendo en cuenta aspectos geomorfológicos, climatológicos, edafológicos y de flora. Se realizó una evaluación de riesgo del área teniendo en cuenta los conceptos de peligro, exposición y vulnerabilidad, y cómo éstos se aplican a la problemática en estudio. Finalmente, se obtuvo como resultado que debido a la presión inmobiliaria y al marcado crecimiento poblacional se dió el loteo de esta área, que no resulta apta para la urbanización. Se destaca la necesidad de un Plan de Ordenamiento Territorial para la ciudad y su correcta aplicación para evitar que se urbanicen zonas no aptas, disminuyendo así el riesgo al cual está expuesta la población. Se requiere que las medidas tengan en cuenta el factor socioeconómico y cultural, ya que estas problemáticas no requieren soluciones netamente técnicas, sino más bien tener una visión holística.

Palabras Clave: Riesgo, Barda, Ambiente, Urbanización.

INTRODUCCIÓN

La localidad de San Carlos de Bariloche se encuentra ubicada al oeste de la provincia de Río Negro (41°09'S - 71°18'O) junto a la Cordillera de los Andes, abarcando aproximadamente 27500 hectáreas de superficie. Esta ciudad, que posee una longitud aproximada de 40 km de largo y de 6 km promedio de ancho, presenta una particularidad que le otorga sus principales características: se encuentra inmersa en el Parque Nacional Nahuel Huapi. La belleza paisajística de la zona, fundamenta el hecho de que el turismo sea la principal actividad económica, la cual se desarrolla desde el año 1934 (Picone, 2013).

En las últimas décadas, la ciudad ha experimentado una acelerada y sostenida tasa de ocupación de las tierras. Dicho proceso ha sido desorganizado y poco controlado, principalmente debido a una escasa planificación de los asentamientos urbanos. Esto ha derivado en una creciente presión sobre los ecosistemas naturales (SEGEMAR, 2005), siendo reafirmado por el crecimiento demográfico exponencial que se dio en la ciudad durante un corto período de tiempo (ver Fig. 1). Al analizar los datos poblacionales desde 1930 hasta 2010, se pudo constatar que el crecimiento poblacional en dicho lapso fue del

6000% (Niembro, 2011). Actualmente, la población en San Carlos de Bariloche es de aproximadamente 150000 habitantes, a la cual se debe adicionar entre 30000 y 100000 turistas por mes. Como consecuencia de esto, se produjo un desarrollo desorganizado de la urbanización que afecta al ambiente directa o indirectamente, viéndose esta situación agravada debido al marcado gradiente eco-ambiental de la región.

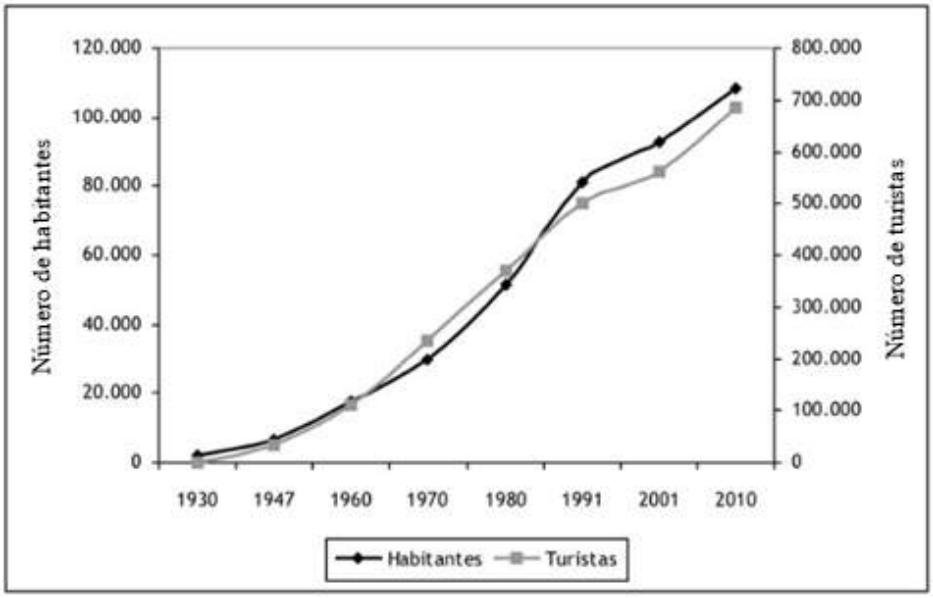


Figura 1. Evolución del número de habitantes y de turistas en Bariloche. **Fuente**: Niembro, 2011.

El desarrollo urbano sin un ordenamiento territorial adecuado que facilite el uso de los distintos suelos de acuerdo a sus aptitudes, supone un gran número de adversidades. Se destaca en la ciudad de San Carlos de Bariloche la problemática de la denominada barda del Ñireco y la llanura aluvial del arroyo homónimo. Ésta, además de no poseer un ordenamiento territorial adecuado, presenta características ambientales que la posicionan de forma desfavorable frente a la urbanización. En el presente trabajo se tiene como objetivo la descripción del riesgo ambiental presente en la zona anteriormente mencionada.

El riesgo puede definirse como la probabilidad de que un evento, de origen natural o antrópico, exceda un determinado nivel de consecuencias sociales, económicas y/o técnicas derivando en un impacto negativo sobre los elementos antrópicos expuestos de un área (Llinares, Ortiz & Marrero, 2004; Maskrey, 1993). Dichas consecuencias están íntimamente relacionadas con los tres factores constituyentes del riesgo: la peligrosidad del evento, el grado de exposición de los elementos sometidos y la susceptibilidad o vulnerabilidad que tienen los mismos a ser afectados por dicho evento (Maskrey, 1993).

Ahora bien, se entiende como peligro o amenaza a todo proceso natural o antrópico que genere una consecuencia negativa sobre la población próxima al sitio donde tuvo lugar el evento. Al hablar de fenómenos o procesos naturales el término hace referencia a cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno. Los mismos pueden o no representar un peligro, efectivamente lo serán únicamente cuando los cambios producidos afecten la vida humana o una forma de vida con la cual el hombre contaba (Maskrey, 1993). La exposición, por su parte, se define como la zona, región, entidad o ente que se ve afectado ante la ocurrencia de un evento asociado a un peligro natural y/o antrópico (ONU, 2012). Por último, la vulnerabilidad es definida como una forma de cuantificar los efectos. Expresa, por lo tanto, la capacidad que tienen las zonas, regiones y/o entidades de anticiparse, enfrentarse, resistir y recuperarse del impacto producido por un agente de una magnitud dada. Se entiende que la vulnerabilidad está

constituida por múltiples factores institucionales, económicos y socio-culturales (Maskrey, 1993; ONU, 2012).

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio se llevó a cabo una caracterización ambiental del sitio, teniendo en cuenta principalmente aspectos geomorfológicos, climatológicos, edafológicos y de flora. Para esto se realizó un relevamiento bibliográfico de la información disponible sobre el área de estudio. La misma fue solicitada al Municipio de San Carlos de Bariloche, para así obtener datos a nivel histórico, estudios científicos e informes técnicos disponibles. Además, se llevó a cabo la búsqueda de noticias relacionadas a la problemática en diversos diarios digitales de la región para, de esta forma, poder analizar los distintos acontecimientos históricos, así como también la visión de la población sobre la problemática. Por último, se realizaron visitas a campo, para constatar la información relevada y la situación actual de la urbanización en la barda del Ñireco. Estas se llevaron a cabo en octubre del 2019. Con todo lo anteriormente mencionado se realizó una evaluación de riesgo del área teniendo en cuenta los conceptos de peligro, exposición y vulnerabilidad, y cómo éstos se aplican a la problemática en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la zona de estudio

La localidad de San Carlos de Bariloche presenta una amplia muestra de paisajes, resultado de la impronta predominante de la acción fluvio glacial y la transformación de 100 años de intervenciones antrópicas (DPA, 2004). Debido a esto, la morfología muestra un territorio con gran variedad de topografías, predominando generalmente las fuertes pendientes y una densa red de drenaje a través de cañadas que atraviesan toda la ciudad (Adler *et al*., 2004). En particular, entre los sectores central y este del casco urbano de la ciudad de San Carlos de Bariloche, se desarrolla el valle donde discurre el arroyo Ñireco (ver Fig. 2). La cuenca del mismo tiene origen en el cerro Ñireco, que se encuentra a 1750 m.s.n.m. y a unos 17 km de la localidad (DPA, 2004). Está conformada por tres subcuencas, la del arroyo Chalhuaco, ubicada en el valle del Chalhuaco, la del arroyo Ñireco superior, ubicada en el Cerro Ñireco, y por último la del arroyo Ñireco inferior. De este modo, esta cuenca atraviesa de norte a sur la ciudad de San Carlos de Bariloche para desembocar finalmente en el Lago Nahuel Huapi.



Figura 2. Localización del A° Ñireco en la localidad de San Carlos de Bariloche. **Fuente**: Google Earth (elaboración propia).

El régimen hidrológico del arroyo es de tipo pluvio nival, caracterizado por crecidas que pueden resultar torrenciales durante el invierno. Hacia fines de la primavera, por efecto del deshielo, se producen crecidas más atenuadas que las anteriormente mencionadas. Sin embargo, en esta época, la ocurrencia de lluvias primaverales, pueden desencadenar un proceso de lavado de nieve aun depositada y provocar crecidas de importancia (DPA, 2004). En particular, la zona de estudio se ubica en el Ñireco Inferior (ver Fig. 3). Las cotas se encuentran comprendidas entre los 800 y 900 m.s.n.m aproximadamente (Pereyra & Helms, 2006). La margen del Ñireco Inferior es especialmente importante ya que, a su izquierda se desarrolla un fuerte escalón topográfico de alrededor de 35 m en promedio con un nivel de terraza aluvial a su pie, llamado localmente como ¨*La Barda*¨ (Adler *et al*., 2004; Rabassa, 1978).

Actualmente, la urbanización en la barda del Ñireco y en la llanura aluvial del mencionado arroyo varía de alta a muy alta densidad, con un 90% del suelo ocupado por infraestructura permanente (ver Fig. 3). Dicha ocupación se da principalmente con residencias, en su mayoría de tipo social (Adler *et al*., 2004). Originariamente, este sector constituía el límite este de la zona más densamente urbanizada, produciéndose su ocupación durante las últimas décadas. Dicho cambio en el uso del suelo, ha conllevado a una restricción en la capacidad de conducción del curso de agua, llegando en ciertos casos a limitar el flujo a anchos mínimos de 10 m (DPA, 2005). Además, ocasionó la desaparición de la vegetación riparia, la cual, protegía las riberas de las crecidas (DPA, 2004).



Figura 3. Urbanización en la barda y la llanura aluvial del A° Ñireco. **Fuente**: Google Earth (elaboración propia).

En cuanto a la geomorfología. la localidad de San Carlos de Bariloche presenta una marcada heterogeneidad ambiental, producto de variaciones geológicas, geomorfológicas, altitudinales, vegetacionales y climáticas (Pereyra & Helms, 2006). El paisaje de la región se encuentra modelado por la Orogenia Andina ocurrida durante los últimos 60 millones de años. Esta configuración tectónica ha sido intensamente modificada por el accionar de los glaciares durante el Cuaternario y, en consecuencia, el relieve y la geomorfología que predominan actualmente en la zona son, en gran medida, resultado de estos dos procesos.

En particular, la barda del Ñireco ocupa un pequeño sector de características geomórficas distintivas. Incluye al abanico aluvial del arroyo Ñireco, niveles de terrazas fluviales y la planicie aluvial. Es posible observar varios niveles de abanicos aterrizados. Esta unidad se encuentra disecando a las morenas marginales de la glaciación del Nahuel Huapi y una pronunciada escarpa de erosión las limita, lo que se denomina barda del Ñireco. Las pendientes y el relieve son relativamente muy bajas, salvo en los resaltos que marginan las terrazas. En las escarpas, en la planicie y en el abanico aluvial la morfodinámica actual es alta, mientras que en el resto de la unidad es baja. El principal proceso que actúa es la erosión hídrica y el aluvionamiento. En la barda del Ñireco la remoción en masa (deslizamientos y flujos) también es importante (Pereyra & Helms, 2006).
A continuación se muestra la ubicación de los glaciares en diferentes eventos y el tipo de los depósitos generados por los mismos (ver Fig. 4).

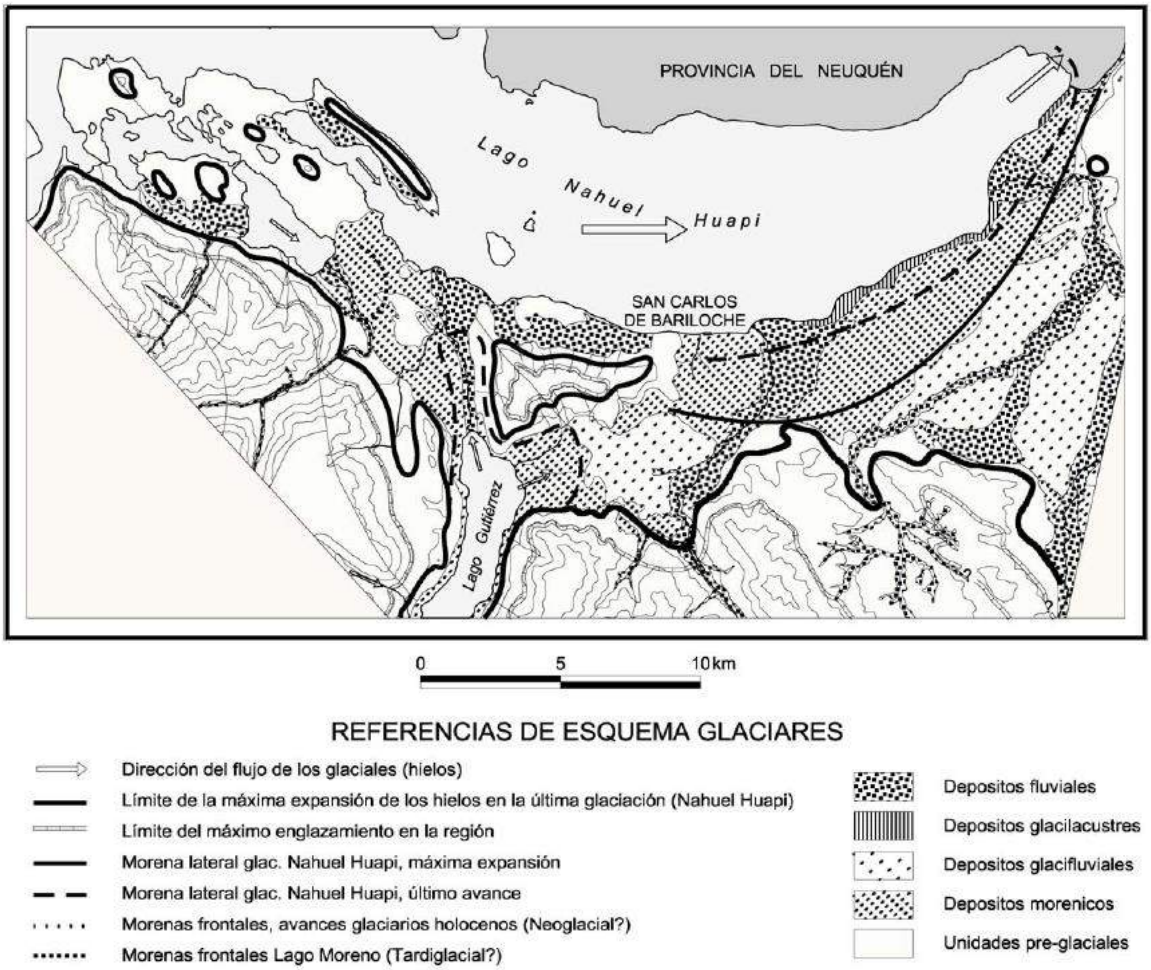


Figura 4. Ubicación de los glaciares en diferentes eventos y tipo y ubicación de los depósitos generados por los mismos. **Fuente**: SEGEMAR, 2005.

El clima de la región se encuentra influenciado por los vientos provenientes del oeste, los cuales pueden alcanzar valores de 100 km/h. La temperatura media anual es de 8°C, sin embargo, se puede apreciar una marcada amplitud térmica entre los meses de verano e invierno. En los meses de invierno las temperaturas rondan los 0°C, e incluso en algunos años, las temperaturas medias para los meses más fríos pueden encontrarse por debajo de este valor (Pereyra & Helms, 2006). Las precipitaciones varían sensiblemente en dirección oeste-este dentro del ejido, observándose una disminución de un 50% para un trayecto de

40 km. De esta forma, en la zona céntrica de la ciudad se alcanzan, en promedio, los 1100 mm anuales, mientras que hacia el este las precipitaciones oscilan entre los 800 y 100 mm anuales, existiendo un marcado déficit hídrico estacional en verano. En líneas generales, durante los meses de mayo, junio y julio se dan el 50% de las precipitaciones. En los sectores más elevados se producen básicamente como fuertes nevadas (Pereyra & Helms, 2006). La ocurrencia de precipitaciones en forma de lluvias de gran volúmen (>100 mm), que duran varios días, es reiterada; dando intensidades relativamente bajas pero sostenidas (Adler *et al*., 2004). En líneas generales, la zona se caracteriza por una permanencia no muy larga de nieve y la existencia de fenómenos de fusión rápida producidas por lluvias templadas posteriores a las nevadas. Estas son causa de fuertes caudales superficiales tanto en los cauces naturales, como en el área urbana (Adler *et al*., 2004).
Los suelos de la zona del arroyo Ñireco son principalmente suelos francos a franco-arenosos finos, moderadamente profundos a profundos, moderadamente ácidos, de drenaje moderado a imperfecto. Estos son característicos en relieves de pendientes muy leves a leves con vegetación predominante de matorrales y estepas. Por último, en relación a la flora, la ladera oeste del valle del arroyo Ñireco poseía una cobertura vegetal estimada de un 70%, constituida básicamente por especies arbustivas de bajo y mediano porte, pudiendo presentar pequeños montes ribereños integrados por *Nothofagus antarctica* (ñire) y *Maytenus boaria* (maitén) (Pereyra & Helms, 2006). Dichas especies vegetales mostraban abundantes y profundas raíces que se entrecruzaban y asomaban (Pereyra & Helms, 2006; Rabassa, 1978). Actualmente la vegetación de la llanura aluvial del arroyo Ñireco se encuentra modificada debido al proceso de urbanización desarrollado en su tramo inferior. También, el tramo medio ha sufrido modificaciones debido a asentamientos, presencia de especies exóticas y desmonte. Es por esto que se puede mencionar que no se conserva el carácter fisonómico-florístico respecto de las formaciones naturales (Pereyra & Helms, 2006).

Evaluación de riesgo ambiental

La peligrosidad geológica natural, sumada al efecto de intensificación debido a la alta presión antrópica, conlleva que la barda del Ñireco presente una muy alta peligrosidad, constituyendo una de las zonas ambiental y socialmente más conflictiva del ejido municipal (Pereyra & Helms, 2006). Las inundaciones, así como la erosión hídrica, son muy significativas y frecuentes. Estos procesos generan los mayores impactos sobre la población de la región dada la inadecuada localización de las viviendas en la llanura aluvial del arroyo. Además, en la barda, la degradación de la vegetación natural es muy alta, esto se ve reflejado en la presencia de especies exóticas, suelo desnudo y la ausencia de las especies nativas. Asociado a esto, los fenómenos de inestabilidad de pendientes son muy frecuentes, especialmente en lo referente a los deslizamientos. Estos fenómenos y la presencia de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en las riberas del arroyo, conllevan que los suelos y el agua, tanto superficial como subterránea, muestren una significativa degradación química y física (Pereyra & Helms, 2006).
En particular, en la llanura aluvial del arroyo, donde se ubican los asentamientos urbanos, existe un pobre desarrollo de la red de drenaje. A su vez, las terrazas aluviales adyacentes al curso desaguan a éste con dificultad debido a las bajas pendientes. Sin embargo, dicha dificultad no representa el mayor peligro sino que, el principal factor relevante son las inundaciones correspondientes a los desbordes del arroyo Ñireco. Es necesario tener en cuenta que el caudal módulo es de 1,8 m^3/s y el caudal máximo es de 4,0 m^3/s (con una recurrencia de 10 años). A pesar de que estos valores no se consideran elevados teniendo en cuenta las características del arroyo, las principales problemáticas ocurren cuando se dan

crecidas extraordinarias. Existen registros de un caudal pico medido de 20,3 m^3/s ocurrido el 13 de octubre de 2002. Dicho evento causó importantes anegamientos en las propiedades existentes en las orillas del cauce y destrucción total de viviendas por la erosión de la margen originada por el flujo de agua. Además, se produjo la destrucción de infraestructura urbana, como puentes, y roturas en la calle ribereña Los Ñires (Adler *et al*., 2004; DPA, 2005). En el año 2004 ocurrió otro evento extraordinario entre los días 29 y 30 de junio, donde se registraron precipitaciones de elevada intensidad. Estas, originaron la fusión de la nieve acumulada, provocando un incremento considerable de la escorrentía de los ríos y arroyos de la zona (Heck & Reverter, 2005). Las siguientes imágenes (ver Fig. 5) son fotos reales del evento ocurrido en el año 2004 que muestran parte de lo que fue el anegamiento de hogares y calles producidos por la crecida.



Figura 5 A y B. Anegamiento de hogares y calles ocasionada por la crecida extraordinaria del A° Ñireco en el año 2004. **Fuente**: Municipalidad de San Carlos de Bariloche.

Por otro lado, mediciones realizadas en la barda indican que la pendiente se encuentra entre los 35° y 40°. Estos valores señalan que las mismas presentan naturalmente un equilibrio o un desequilibrio leve, lo cual implica que se pueden esperar, en condiciones naturales, pequeños movimientos como respuesta a grandes lluvias o a sismos relativamente anómalos. A su vez, es altamente probable que se produzcan movimientos gravitacionales ante cualquier intervención humana que modifique las condiciones naturales. De este modo, se puede mencionar que la barda del Ñireco es una escarpa activa desde el punto de vista de la remoción en masa y la erosión hídrica, siendo esta última de menor importancia relativa (Pereyra & Helms, 2004). Dentro de la amplia gama de procesos de remoción en masa existentes, dadas las características naturales de los depósitos y la geomorfología del sector, los más probables serían los deslizamientos, en particular, los planares y rotacionales de pequeñas dimensiones. Estos, si bien se encuentran dentro de los menos riesgosos, pueden destruir viviendas y ocasionar pérdidas humanas. Muchos sectores de la barda presentan evidencias de deslizamientos, como ser acumulación de material al pie de la pendiente. Asimismo, se han observado en diversos estudios numerosas grietas en la parte superior de la pendiente, las cuales actúan como potenciales planos de deslizamiento (Pereyra & Helms, 2004). A continuación se presentan deslizamientos ocurridos debido a las precipitaciones extraordinarias del año 2004 (ver Fig. 6).



Figura 6 A, B, C y D. Deslizamientos en la barda del Ñireco ocasionados por fuertes precipitaciones en el año 2004. **Fuente**: Municipalidad de San Carlos de Bariloche; Pereyra & Helms, 2006.

Con respecto a la presencia de residuos, se puede mencionar que en el año 2015 se destacó en diversos diarios digitales la preocupación por parte de la población debido a la acumulación de RSU en un área que estaba destinada a ser parquizada en la barda del Ñireco. Asimismo, se puede mencionar que, a pesar de que la gestión de los residuos es una problemática general de Bariloche, hay sectores donde la situación se agrava aún más. Uno de dichos sectores es la barda del Ñireco, donde se arrojan todo tipo de desechos. Estos ocasionan múltiples consecuencias, entre las cuales se destacan los incendios constantes de los mismos en la época del verano. En las visitas a campo llevadas a cabo se pudo visualizar que la problemática de los RSU aún sigue vigente, lo cual se ve reflejado en la presencia de residuos en los bordes de riberas del arroyo Ñireco (ver Fig.7). Algunos de los peligros asociados a este fenómeno son: la potencial contaminación del curso de agua, la proliferación de vectores y el impacto sobre la salud de las personas. Este último se sustenta en el hecho de que el arroyo Ñireco atraviesa numerosos barrios y su desembocadura, en el lago Nahuel Huapi, es lindera al balneario municipal.



Figura 7. Residuos observados durante la salida a campo en la ribera del arroyo Ñireco. **Fuente:** Elaboración propia.

En cuanto a la exposición, (ver Fig. 8) se presentan los barrios que se encuentran expuestos a los peligros naturales comentados anteriormente. Se destaca que los mismos se encuentran asentados tanto sobre la llanura aluvial del arroyo Ñireco (1-2-3-4-5-6-8), como también sobre la barda (7). Si bien los asentamientos de la zona oeste de la barda son los que históricamente sufrieron las consecuencias de encontrarse en una zona riesgosa, también es importante tener en cuenta aquellos ubicados en el sector este y aguas abajo. Esto se debe a que los mismos también se encuentran asentados dentro de la llanura aluvial del A° Ñireco.



Figura 8. Representación de los asentamiento urbanos presentes en la llanura aluvial y barda del arroyo Ñireco. **Fuente**: Municipalidad de San Carlos de Bariloche (elaboración propia).

En cuanto a las medidas tomadas por el gobierno municipal, es importante mencionar que en el año 1977 se promulgó la Ordenanza Nº 121-I-77, la cual prohíbe las construcciones

en la barda oeste del arroyo Ñireco y construcciones sobre la pendiente morenítica de ángulo de reposo superior a los 35°. Posteriormente, en el año 1979, se aprobó la Ordenanza 111-I-79, la cual, teniendo en cuenta la Ordenanza mencionada anteriormente, determina y detalla las áreas con prohibición para construir. Sin embargo, estas normativas no han sido efectivas, ya que la zona se encuentra actualmente urbanizada y ocupada por infraestructura destinada a diversos fines.

Más tarde, por parte de la Municipalidad de San Carlos de Bariloche, existieron diversas medidas tomadas con el fin de desocupar la zona de la barda del Ñireco y disminuir la exposición de la población al peligro natural. Tal es el caso de la Ordenanza N° 2227-CM-11, la cual creó el Plan de Viviendas denominado "*270 viviendas*". El mismo tenía como objetivo reubicar a las familias que habitaban en la barda del Ñireco y en los barrios San Cayetanito y 21 de Septiembre. A su vez, establece la demolición de los hogares desalojados y que la titularidad de los terrenos pase a ser del Municipio, el cual debía asegurar que dichas zonas no sean ocupadas nuevamente. Sin embargo, ni la construcción de las 270 viviendas ni la prohibición fueron suficientes para sanear la zona de riesgo de la barda del Ñireco. Diversas problemáticas institucionales dentro del Municipio dificultaron el proceso de traslado de las familias y paralizaron el proyecto de parquización de ese inestable sector. Esto facilitó la ocupación de los terrenos por parte de la sociedad. Dos años después, en abril del 2015, mediante un amparo del Instituto Municipal de Tierra y Vivienda para el Hábitat Social (IMTVHS), se dispuso prohibir la ocupación de las viviendas que habían sido desalojadas y los lotes aledaños, donde la edificación está prohibida por peligro de desmoronamiento.

En relación a la vulnerabilidad del sitio, se destaca que una de las primeras normativas municipales relacionadas al concepto de vulnerabilidad es la Ordenanza N° 379- CM-90, la cual declara como "*zona de alto riesgo para asentamientos urbanos a toda la barda del arroyo Ñireco, sobre su margen izquierda y dentro del ejido urbano de la ciudad"*. Además ratifica las restricciones existentes a cualquier tipo de construcción en dicha área. Posteriormente, mediante la Resolución N° 1543-I-08, se declaró a la denominada barda del Ñireco como área de *daño temido* en los términos del Artículo 175 de la Carta Orgánica Municipal; el cual establece que toda actividad que suponga un daño temido, actual o inminente al ambiente debe cesar y conlleva la obligación de recomponer e indemnizar. A su vez, se estableció la promoción de todas las medidas necesarias para lograr una solución definitiva a los problemas ambientales existentes en la zona referida. Luego, asociada a esta resolución, el Municipio estableció mediante la Resolución N° 3061-I-08, suspender definitivamente todo tipo de actuaciones administrativas relativas a la presentación y/o trámite que involucre la ocupación de los predios de la barda del Ñireco, incluyendo consultas preliminares, previas de anteproyectos, certificados de ocupación, entre otros. Además en el año 2010, mediante la Resolución 1940-I-10, la intendencia de San Carlos de Bariloche declara la emergencia climática en la zona.

Luego del evento ocurrido en el año 2002, se construyeron bordos de defensa. Sin embargo, las medidas tomadas no fueron completamente eficientes, pudiendo visualizar que las defensas construidas no son estables. Esto se debe a que no presentan una capa protectora contra la erosión del agua, no se han compactado ni perfilado de forma adecuada y presentan discontinuidades en los puentes. Esto trae como consecuencia que sean fácilmente arrastrados por la corriente en el caso de un episodio importante de caudales. A su vez, obstaculizan el drenaje de las calles adyacentes a los mismos (Adler *et al*., 2004). En el año 2004, como ya se mencionó anteriormente, ocurrió otro evento extraordinario de crecidas. Posterior a dicho evento se llevaron a cabo diversos proyectos en los cuales se proponen obras que podrían efectuarse como medidas de protección. Uno de ellos es el realizado por el Departamento Provincial de Aguas (DPA) en el año 2004. Dicho organismo realizó la elaboración de un proyecto de obras de estabilización de márgenes y recuperación de las

riberas del arroyo Ñireco en el tramo inferior del mismo. Este proyecto contempla la adecuación de la capacidad de conducción para los caudales fijados por el DPA, sobre la base de estudios previos (DPA, 2004). Otro de los proyectos llevados a cabo, fue el realizado por Pereyra & Helms en el año 2006 en el marco de un Convenio de Cooperación Técnica Geológico Argentino Alemán. Dicho proyecto brinda medidas de protección para la barda del Ñireco en donde, teniendo en cuenta los aspectos físicos, reconocen los principales factores de peligrosidad natural en la zona. Además elaboraron algunas propuestas de estabilización de las pendientes, sumadas a pautas de ocupación del territorio que permiten la mitigación de los potenciales efectos de futuros fenómenos sobre la población (Pereyra & Helms, 2006).

En las visitas a campo, se pudo visualizar la presencia de infraestructura correspondiente a medidas estructurales tomadas para la protección de la población ante eventos naturales peligrosos. Algunas de estas presentan, a simple vista, un marcado deterioro (ver Fig. 9).



Figura 9 A, B, C y D. Medidas estructurales para la disminución del riesgo ambiental en el arroyo Ñireco. **Fuente:** elaboración propia.

CONCLUSIÓN

La presión inmobiliaria en un territorio codiciado por sus bellezas naturales y el marcado crecimiento poblacional que se dio en la localidad generó loteos en áreas sin aptitud para la urbanización o que, al menos, hubieran requerido respeto y consideración a la morfología y la red natural de drenaje (Plan Director de Drenaje Pluvial Urbano, 2005). Este es el caso de los barrios presentes sobre la llanura aluvial del arroyo Ñireco y sobre la barda del mismo, los cuales están expuestos a peligros naturales y antrópicos.

La población que vive en la zona ha sufrido en distintas ocasiones tanto destrucción de sus viviendas e infraestructura pública básica, como también daños a la salud. Tal como mencionan los vecinos "*Los que vivimos acá no pensamos en los riesgos que tiene este lugar. Simplemente es el lugar donde podemos vivir*".

La necesidad de un Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de San Carlos de Bariloche, así como también su correcta aplicación, resulta clave para evitar que estos procesos de urbanización ocurran en zonas no aptas. Ésto, a su vez, disminuye el riesgo al cual está expuesta la población.

A pesar de los numerosos estudios que se han realizado y de las diversas medidas que han sido tomadas para proteger a los vecinos de la zona, estas no han sido suficientes. Se requiere que las medidas a tomar tengan en cuenta el factor socioeconómico y cultural, ya que estas problemáticas no requieren soluciones netamente técnicas, sino más bien medidas que tengan en cuenta una visión holística.

REFERENCIAS

Adler F. J., Paz, H. R. & R. R. Lazarte Sfer. Plan Director para el Manejo de Aguas Pluviales de la Ciudad de San Carlos de Bariloche (Río Negro, Argentina). (2004).

Departamento Provincial de Aguas (DPA). Proyecto de estabilización de cauce y recuperación de riberas. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. (2004).

Departamento Provincial de Aguas (DPA). Informe final: Arroyo Ñireco - Estabilización de cauce y recuperación de riberas. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. (2005).

Heck, J. P., & Reverter, M. Estabilización de márgenes y recuperación de riberas-arroyo Ñireco-San Carlos de Bariloche. (2005).

Maskrey A. Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. (1993).

ONU-Gobierno de España. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. (2012).

Pereyra F. X. & F. Helms. Medidas de Protección barda del Ñireco. Serie contribuciones técnicas: Peligrosidad sísmica. SEGEMAR. Buenos Aires, Argentina. (2006).

Rabassa J. & E. Dominguez. Estabilidad de la ladera oeste del valle del Río Ñireco. Municipalidad de San Carlos de Bariloche. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. (1978).

CUÑAS DE SUBDUCCIÓN Y EROSIÓN TECTÓNICA INFERIDAS A PARTIR DE EVIDENCIAS SISMOLÓGICAS EN EL MARGEN CHILENO

Navarro-Aránguiz A.[a,b], Comte D.[a,c], Calle-Gardella. D[a], Farías M.[b,], Roecker S.[d] y Rietbrock A.[e]

[a]*AMTC-FCFM Universidad de Chile, Santiago, CHILE*
[b]*Departamento de Geología, FCFM Universidad de Chile, Santiago, CHILE*
[c]*Departamento de Geofísica, FCFM Universidad de Chile, Santiago, CHILE*
[d]*Rensselaer Polytechnic Institute, Earth & Environmental Sciences, Troy, NY, UNITED STATES*
[e]*Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, GERMANY*

e-mail: andrea.navarro@uchile.cl

RESUMEN

La mecánica de cuñas resulta conveniente para estudiar la formación de orógenos y uno de los procesos clave, la erosión tectónica, suele atribuirse a fuentes de rugosidad como montes submarinos, horst y grabens. Sin embargo, la erosión por subducción también es importante, tanto en la fractura de la corteza superior, como en el desarrollo de fallas en las interfaces de alta fricción basal. En este sentido, la acreción basal de una cuña bivergente incluye sedimentos y rocas corticales, estando directamente relacionada a la erosión por subducción. Investigaciones recientes del margen chileno utilizando tomografía sísmica local han identificado zonas de anisotropía sísmica dentro de la litósfera continental que pueden estar asociadas con trozos de placa superior acumulados basalmente. Estas anomalías son adyacentes a zonas con altos Vp/Vs relacionadas a un manto litosférico serpentinizado y también cercanas al límite friccional de los terremotos interplaca. Como el margen norte y central de Chile ha sido erosivo desde al menos el Oligoceno tardío, proponemos un mecanismo de extracción de la corteza, en el que la erosión por subducción fractura la corteza y crea fallas que extraen trozos de la placa superior que se mueven con la placa oceánica. En cuanto al modelo de cuña bivergente convencional, proponemos que debiese considerar la existencia de rocas corticales que avanzan más allá del límite inferior de la corteza continental, coexistiendo con material mantélico. Como resultado, la parte inferior de la cuña estaría ubicada dentro del manto litosférico y no sería controlado por el Moho como se ha propuesto para otras zonas de subducción.

Palabras Clave: Tomografía Sísmica, Cuña Bivergente, Erosión por Subducción, Margen Chileno.

INTRODUCCIÓN

Chile se encuentra en el margen occidental de América del Sur, continente caracterizado por una historia geológica de acreción de terrenos, cambios en el régimen de esfuerzos y diferentes procesos de subducción (*e.g.*, Ramos et al., 1986; Ramos & Vujovick 1993; Bahlburg & Hervé, 1997; Fuck et al., 2008; Charrier et al., 2007; Ramos et al., 2010; Charrier et al., 2015). Actualmente el margen corresponde a un límite convergente

caracterizado por la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana y por la existencia de dos cadenas montañosas: la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes. El margen en su zona norte y central se habría caracterizado por ser erosivo al menos desde el Oligoceno tardío (*e.g.*, Stern ,1991; Kay et al., 2005).

La relación de las cadenas montañosas en el margen chileno con el proceso de subducción ha sido arduamente estudiada. En la Cordillera de los Andes existe evidencia de sismicidad cortical activa y se han propuesto modelos de doble subducción (Armijo et al., 2010; Farías et al., 2010; Ammirati et al., 2019). La estructura de los Andes permite inferir que el frente de deformación del orógeno proviene desde el oriente (Farías et al., 2010; Astini & Dávila., 2010) y trabajos más recientes proponen niveles de despegue bajo los Andes que podrían conectarse a la placa oceánica *(e.g.*, Linkimer et al., 2020).

En el presente trabajo realizamos una breve recopilación de estudios recientes que han desarrollado tomografías en el margen central de Chile (zonas de Illapel, Valparaíso y Pichilemu) a partir del registro de sismicidad natural en diferentes períodos. Estos estudios visualizan anomalías que se podrían vincular a elementos de una cuña de subducción bajo la Cordillera Costera, como complejos acrecionarios, la existencia de fallas en el prolado de dicha cuña y un área delimitada por un posible límite de cizalle en el manto en el cual existiría material cortical por erosión por subducción. La metodología utilizada es la desarrollada en Comte, et al., 2019, de la cual se obtiene una tomografía a partir de la sismicidad local.

Cordillera Costera en Illapel:

Comte et al., 2019 estudian la zona de Chile Central entre los 30°-32°S que comprende la zona catalogada como “Norte Chico”. El área específica de estudio es la de ruptura del terremoto de Illapel Mw 8.3 del 2015. La sismicidad local utilizada corresponde a la registrada un año por la red sismológica CHILLAX posterior al sismo principal.

De acuerdo a lo observado en la tomografía (Fig. 2), Comte et al., 2019 postula que la región triangular delimitada por dos gradientes de alta velocidad de onda P y bajo Vp/Vs es una cuña de subducción (Fig. 3), cuya génesis sería la remoción de material por erosión por subducción. Esta interpretación tectónica de las anomalías de velocidad es consistente con las observaciones geológicas de alzamiento y extensión en esta parte del margen costero chileno. Las características de esta cuña, como su forma y la falta de correlación con el entorno tectónico de arco posterior coetáneo, sugieren que los Andes no están directamente acoplados con el comportamiento de la interfaz de subducción.

Un elemento de las cuñas que se menciona es el punto S o punto de desacople donde se unen las zonas de cizalle características de una cuña bivergente. De acuerdo con este estudio, el punto S es concordante con el límite friccional inferior de los terremotos de subducción (*downdip frictional limit*) a ca. 60 km de profundidad.

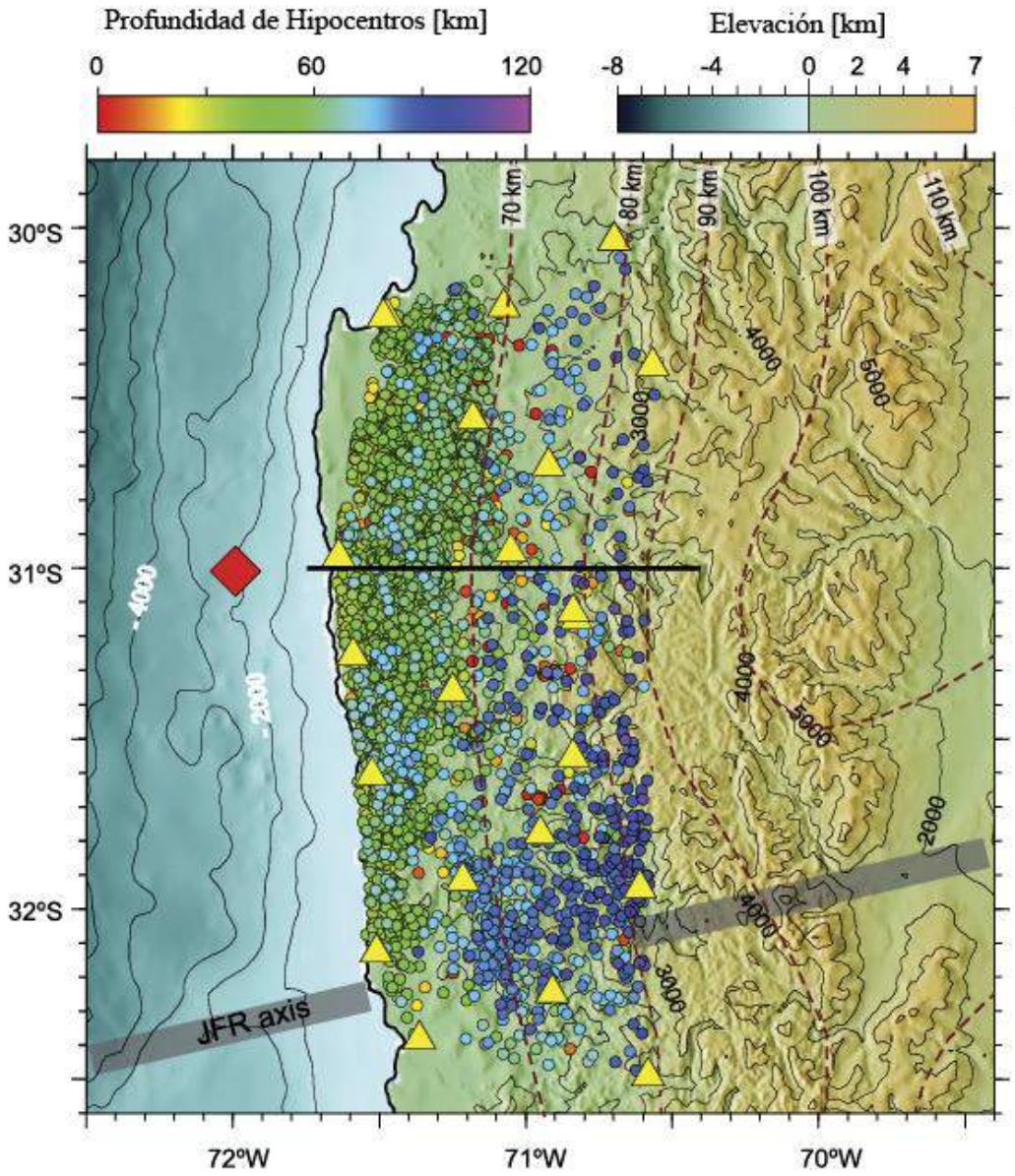


Figura 1. Mapa de la zona de estudio. JFR axis hace referencia al eje de la dorsal de Juan Fernández. La red sismológica se representa por los triángulos amarillos. El diamante a los 31°S representa el epicentro del terremoto de Illapel Mw del 2015. La sismicidad observada es la local registrada por las estaciones instaladas. El trazo negro a los 31°S es el perfil vertical de los modelos de la Fig. 2. Modificado de Comte et al., 2019.

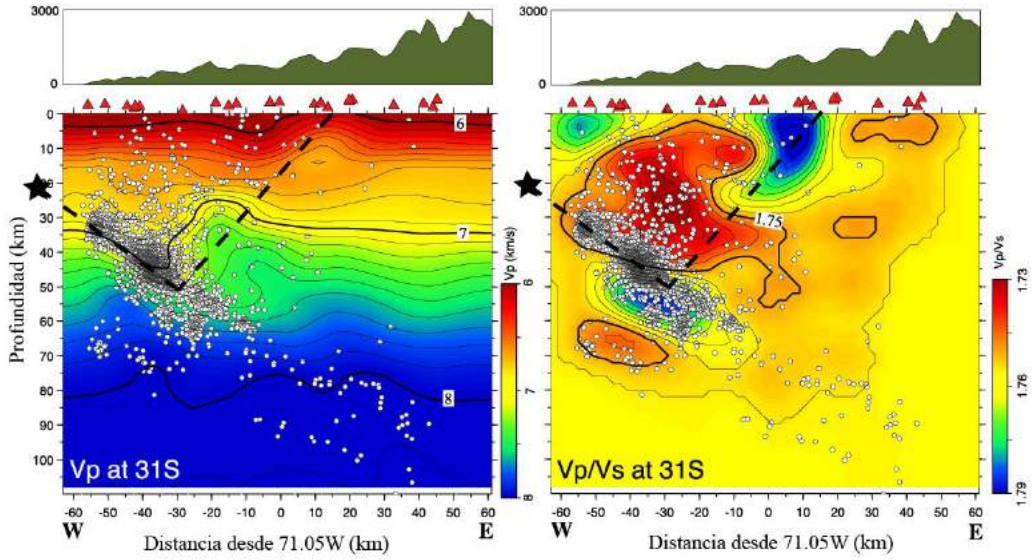


Figura 2. Secciones transversales EW de Vp, Vp / Vs e hipocentros a 31°S. Los círculos blancos localizan hipocentros dentro de ± 20 km NS de 31°S. La región de mayor liberación de momento (centroide) del choque principal de Illapel se muestra como la estrella negra a la izquierda de las secciones. Las líneas discontinuas delinean los lados pro y retro de la cuña de subducción propuesta. Los triángulos rojos son proyecciones de la red sismológica en esta sección. Un perfil verticalmente exagerado de la topografía aparece sobre cada sección con elevaciones en metros. Imagen de Comte et al., 2019.

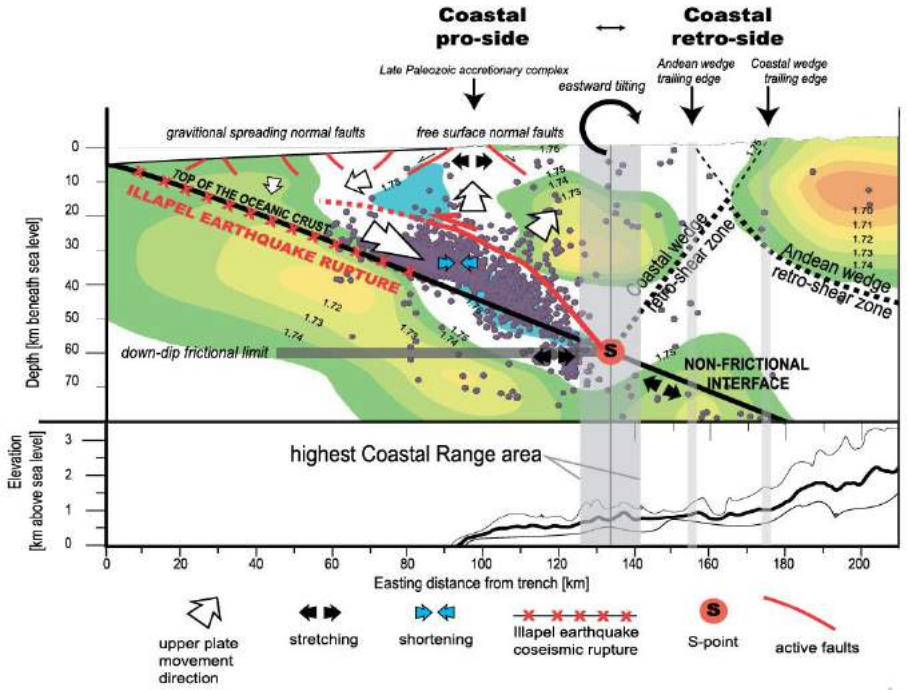


Figura 3. Interpretación de la arquitectura estructural del margen continental en la región de Illapel. Panel superior: como fondo de referencia, los contornos de color representan variaciones W-E en Vp / Vs a 31.5 °S y los círculos sólidos muestran hipocentros dentro de ± 20 km de esta sección. Panel inferior: elevaciones mínimas, medias y máximas a lo largo de los perfiles de topografía orientados W – E dentro de ± 20 km de 31.5°S. La cuña costera en tierra coincide con un monoclinal de manteo hacia el este que está limitado al oeste por un complejo de acreción del Paleozoico Tardío (complejo metamórfico Choapa). Las fallas normales en este complejo están relacionadas con la sismicidad de la zona y acomodan el alzamiento resultante del engrosamiento de la cuña, similar al estiramiento axial en un

anticlinal en crecimiento. El engrosamiento más profundo está relacionado con la sismicidad y ocurre como un apilamiento compresivo de trozos corticales transportados hacia abajo desde el borde de la cuña hasta el punto S. Las fallas normales costa afuera son causadas por el ajuste gravitacional después de la erosión tectónica de la cuña costera. El reciclaje de la masa erosionada en y por encima del punto S conduce a que las elevaciones más altas de la cuña costera se ubiquen directamente sobre ella. Imagen de Comte et al., 2019.

Cordillera Costera en la zona de Valparaíso:

La zona de estudio en este caso es la Cordillera Costera entre los 32°-34°S (Navarro-Aránguiz, 2020). Este macizo posee un dominio occidental y un dominio oriental. El dominio occidental se caracteriza por un relieve suavizado, con distintos niveles de terrazas de abrasión marina y elevaciones entre 100 a 500 msnm. Posee estructuras principales de orientación NO, las cuales generan un sistema de bloques de desplazamiento vertical post-Plioceno junto a fallas menores de orientación NE.
El dominio oriental de la cordillera posee relieve escarpado con alturas que superan los 2 msnm, constituyéndose principalmente de intrusivos cretácicos y secuencias volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico Inferior. Estas secuencias forman el homoclinal del limbo W de un sinclinorio donde las unidades mantean entre 20°-70° hacia el E (Vergara et al., 1995).
La sismicidad en el área de Valparaíso, Chile, fue registrada por una densa red de estaciones sismológicas de período corto entre abril y noviembre de 2017 (ver Fig. 4). A partir de estos registros se determinó un modelo 3D de velocidades de ondas de cuerpo por medio de tomografía sísmica pasiva (Navarro-Aránguiz et al., 2019; Navarro-Aránguiz, 2020).
A partir de la Tabla I interpretamos las anomalías en el perfil S3 (ver Fig. 5). En la Fig 5. A. a aproximadamente 30-40 km por debajo de la costa se visualiza un área asociada con un aumento de Vp, pero una disminución de Vs, que en el modelo Vp / Vs se asigna como comportamiento tipo F. Esta anomalía podría estar asociada con material basáltico y podría ser corteza oceánica acretada (Christensen, 1970). Hacia el E de la anomalía, el comportamiento se asocia con un tipo B, que revela la existencia de fluidos entre 30-40 km de profundidad por debajo del área entre la costa y la Cordillera de la Costa Occidental. Esta zona sería un trozo de manto parcialmente serpentinizado más somero y colindaría al E con rocas fracturadas (anomalías de tipo C).
En este modelo identificamos acreción de secciones corticales con presencia de fluidos (Fig. 5B), lo que podría indicar un almacenamiento de volátiles. La formación de secciones corticales podría estar relacionada con fallas normales (Navarro-Aránguiz et al., 2019; Navarro-Aránguiz, 2020). Las fallas en la corteza superior cerca del contacto interplaca podrían formarse por desvolatización (principalmente de H_2O) en la corteza superior. Estos volátiles podrían haberse almacenado en sedimentos subducidos y/o en la corteza oceánica (*e.g.*, Peacock, 1999). Sin embargo, el pequeño tamaño del prisma de acreción en el área (Contreras-Reyes et al., 2015), un margen destructivo al menos del Oligoceno y la anomalía tipo F en relación con la roca baja en sílice, indicaría que el origen de los fluidos sería la corteza oceánica y que la erosión por subducción jugaría un papel importante en el desarrollo de fallas y en el arrastre de corteza oceánica y continental.

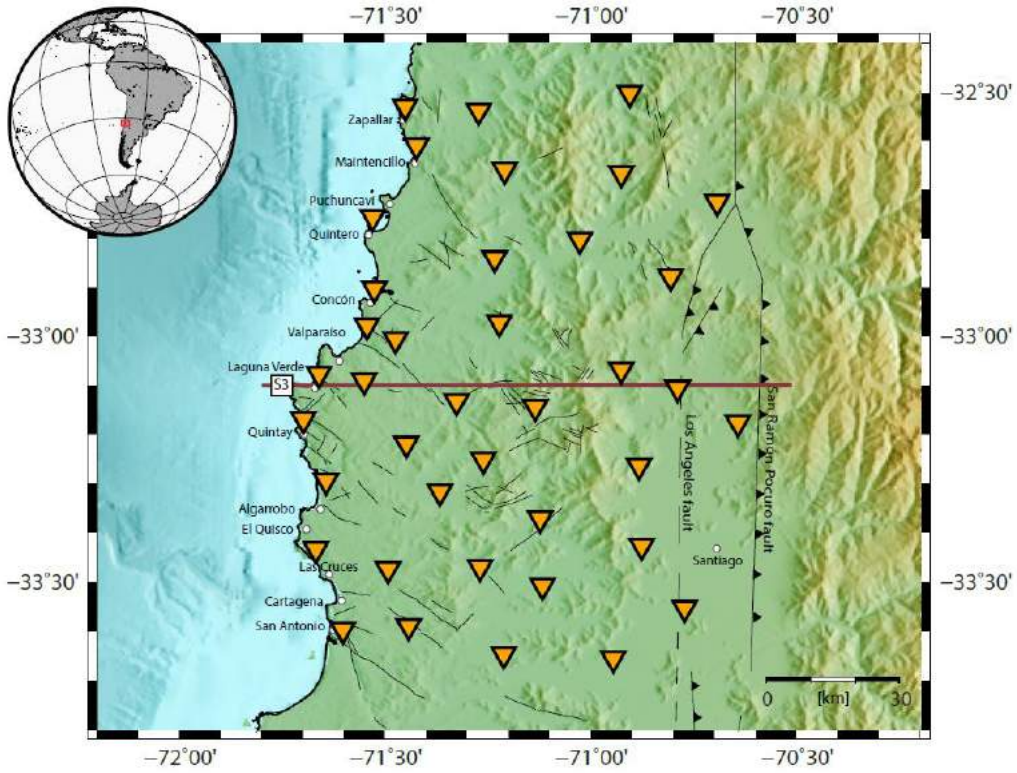


Figura 4. Mapa con la distribución geográfica de la red de estaciones del 2017 (triángulos naranja), estructuras en el margen sobre la Cordillera de la Costa (trazadas como líneas negras continuas) y fallas inversas principales en la Cordillera de los Andes (Los Ángeles y San Ramón-Pocuro). A los 33.1°S se visualiza una recta roja referente al perfil vertical S3 (Fig. 5).

Tabla I: resumen de tendencias de comportamiento de anomalías de velocidades de cuerpo y su interpretación respectiva, de acuerdo con diversos autores (O'Connell & Budiansky, 1974; Christensen & Mooney, 1995; Christensen, 1996).

Nombre	Anomalía Vp	Anomalía Vs	Anomalía Vp/Vs	Interpretación
A	Vp ↑	Vs ↑	Vp/Vs ↑	Roca de composición básica a intermedia, consolidada
B	Vp ↓	Vs ↓↓	Vp/Vs ↑	Roca básica a intermedia, fracturada e hidratada. Podría indicar comportamiento dúctil
C	Vp ↓↓	Vs ↓	Vp/Vs ↓	Roca básica a intermedia, fracturada y seca
D	Vp ↓	Vs ↑	Vp/Vs ↓	Roca intermedia a ácida, no es sometida a una presión mayor tal que genere un incremento significativo en Vp. Podría indicar metamorfismo de grado bajo/medio
E	Vp ↑	Vs ↑↑	Vp/Vs ↓	Roca intermedia a ácida, sometida a una presión mayor tal que genere un incremento significativo en Vp. Podría indicar metamorfismo de grado bajo/medio
F	Vp ↑	Vs ↓	Vp/Vs ↑	Roca con baja cantidad de sílice

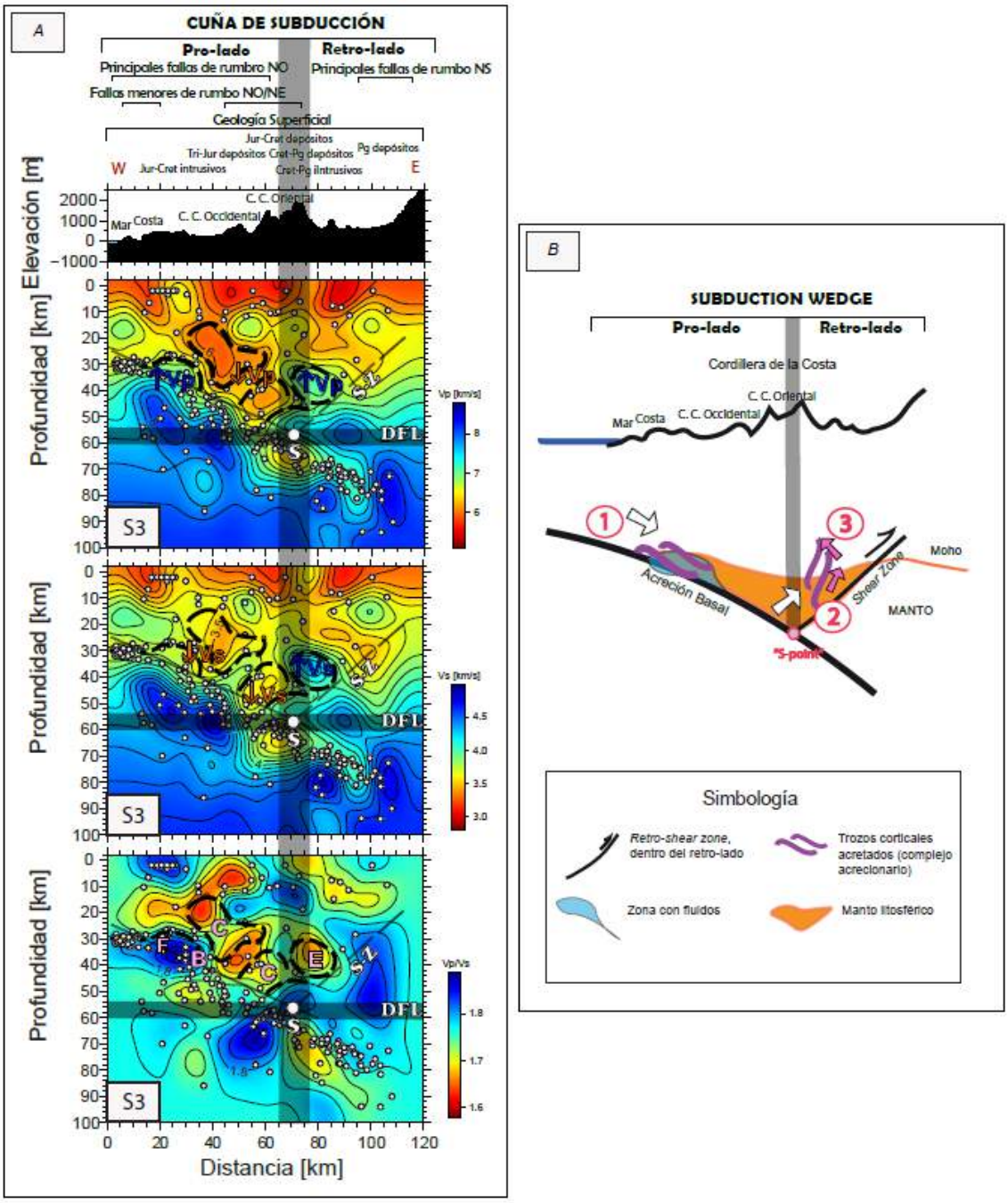


Figura 5. Interpretación de la cuña de subducción basada en modelos Vp, Vs y Vp / Vs (Figura A), perfil S3. **A.** Abreviaturas: Pg: Paleógeno; Cret: Cretácico; Jur: Jurásico; Tri: Triásico; C.C.: Cordillera de la Costa; DFL: *downdip frictional limit*; S: punto S; S-Z: *Shear Zone*. **B.** Números: Etapa 1: Acrecimiento basal de trozos corticales, la flecha blanca indica su dirección de desplazamiento; Etapa 2: complejo de acreción arrastrado hacia el punto S por erosión por subducción, la flecha blanca indica su dirección de desplazamiento a la zona de retrocizalla (*retro-shear zone*); Etapa 3: Desplazamiento del complejo de acreción en la zona de retrocizalla, las flechas rosadas indican la dirección del material. El reacomodo de esfuerzos en las etapas 2 y 3 genera un alzamiento topográfico.

Sistema de Fallas de Pichilemu:

Calle-Gardella et al., (2020) analizan Chile Central entre los 34-35°S (Fig. 6). Esta zona se caracteriza por la presencia del complejo metamórfico de Pichilemu el cual sería un prisma generado en el ciclo gondwánico dividido en una serie oriental y una occidental, las que representan la acreción frontal y basal respectivamente.

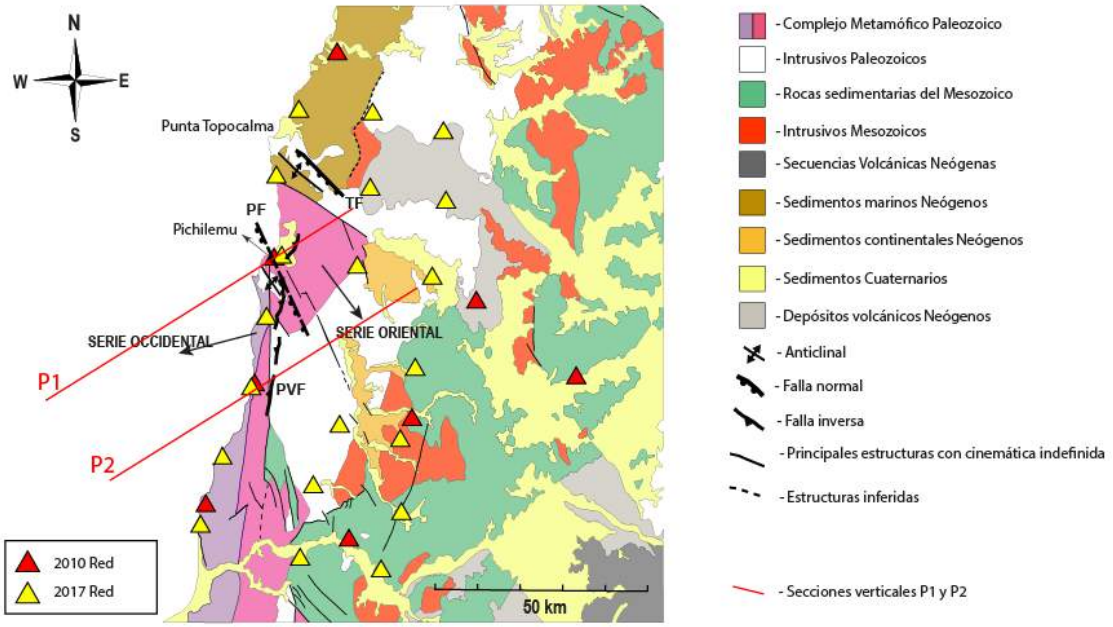


Fig. 6: Mapa geológico de la región de Pichilemu (modificado a partir de SERNAGEOMIN 2003, Hervé et al., 2013, Farias et al., 2011) que muestra las principales estructuras geológicas de la zona, y la ubicación de las estaciones sísmicas utilizadas en este estudio. Las principales estructuras son TF: Falla Topocalma, PF: Sistema de Fallas de Pichilemu y PVF: Falla de Pichilemu-Vichuquén (Farias et al., 2011). Los triángulos amarillos y rojos localizan las redes temporales instaladas en 2010 y 2017, respectivamente. Las líneas rojas localizan las secciones utilizadas en el presente resumen. Modificado de Calle-Gardella et al., 2020 (en preparación).

A partir del estudio de datos sismológicos de redes desplegadas los años 2010 y 2017, junto a la construcción de modelos 3D de velocidades por medio de tomografía sísmica pasiva (Calle-Gardella et al., 2017; Calle-Gardella, 2018; Calle-Gardella et al., 2020) se concluye que gran parte de la sismicidad se asocia al Sistema de Fallas de Pichilemu.
A partir de la tomografía (Fig. 7) y el análisis geológico superficial, se determina que la traza principal del sistema posee una extensión de 50 km de longitud, teniendo unos 30 km de profundidad, un rumbo de NNO y un manteo de 55°. Los altos valores de Vp/Vs en la falla principal sugieren hidratación del contacto interplaca.

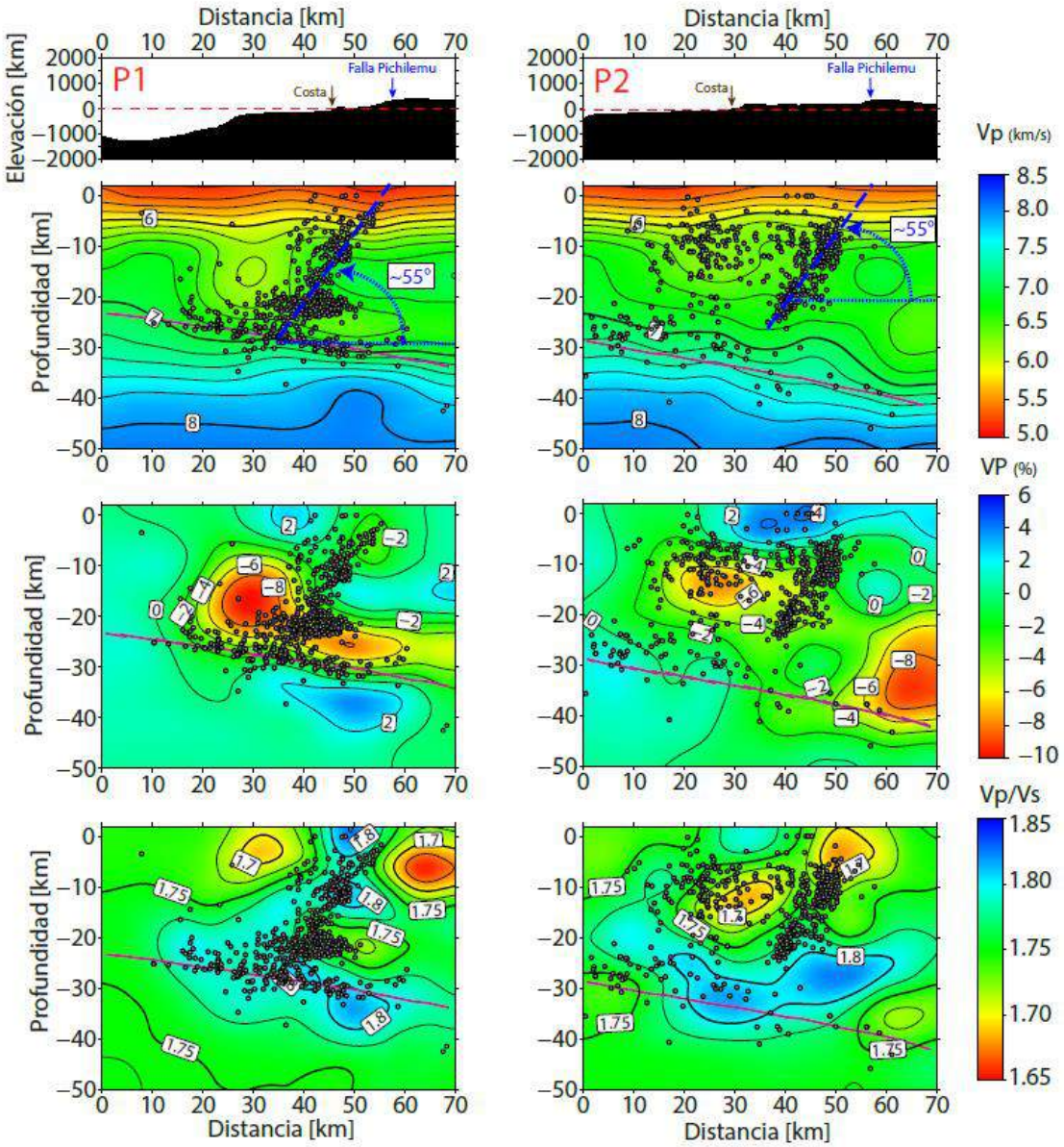


Figura 7. Modelo de Vp, Vp% y Vp/Vs para las secciones verticales P1 y P2. Se visualiza en rojo la línea de tendencia del *slab*. Para el modelo de Vp, se traza en azul el manteo de la falla principal del sistema. Modificado de Calle-Gardella et al., 2020.

Sobre la zona de la cuña mantélica, el alto valor Vp/Vs se relaciona con una disminución de Vp, lo cual indicaría una hidratación de la zona producto de la liberación de fluidos desde reacciones metamórficas en la placa oceánica.

Basándose en los elementos de una cuña de subducción en el margen chileno descrito por Comte et al., 2019, el sistema de fallas podría vincularse al proceso de hidrofracturamiento y génesis de fallas normales producto de una acreción basal en una cuña bivergente. De este modo el sistema de fallas que conecta con la interfaz entre placas se relacionaría con la acreción basal de material cortical por erosión por subducción.

DISCUSIÓN: RELACIÓN SUBDUCCIÓN CON LOS ANDES

Los resultados vinculan en primera línea a la Cordillera de la Costa con el proceso de subducción y como se plantea en Comte et al., 2019, la Cordillera de los Andes podría no estar acoplada a la interfaz de las placas. Si bien la resolución de los 3 estudios presentados no logra visualizar nexos con la Cordillera de los Andes, otros estudios han analizado las estructuras y sismicidad de los Andes, evidenciando que el frente de deformación va de Este a Oeste, proponiéndose fallas o niveles de despegue que podrían vincular los Andes con el contacto interplaca (Farías et al., 2010; Astini & Dávila., 2010; Linkimer et al., 2020). Pese a la debatible existencia de un acople Andes-Placa de Nazca, las observaciones de los estudios mencionados nos permiten inferir la presencia de otra cuña que compondría la cordillera andina, sin embargo, se necesitan más datos sismológicos en los Andes para comprobar.

CONCLUSIÓN

Mediante tomografías se identifican anomalías que nos permiten caracterizar la Cordillera de la Costa como la cuña del complejo de subducción con un desarrollo significativo de un complejo acrecionario basal dada la combinación de velocidades altas y bajas en la base de la cuña, que sería la responsable de la topografía actual de la Cordillera de la Costa. Esta cuña se constituiría por un prolado más acotado debido a la erosión que marca la historia geológica del margen chileno y un retrolado caracterizado por el homoclinal que mantea hacia el este, presente en el dominio oriental de la cordillera.

En lo que respecta a elementos que nos permitirían indagar en el proceso dinámico de la cuña, existen anomalías de velocidades que pueden vincularse a fallas en el margen que están en contacto la interfaz interplaca. Este tipo de fallas podría deberse al hidrofracturamiento y/o estar relacionadas al proceso de erosión por subducción, por lo que proponemos que el mecanismo de extracción de corteza se relaciona con la dinámica de la cuña de subducción en donde la erosión por subducción genera fracturas corticales generando fallas que posteriormente extraen trozos corticales de la placa superior. Estos se acretarían formando complejos acrecionarios y/o melánges que se desplazarían concordantes a la placa oceánica y que llegarían más allá del límite corteza-manto continental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco de los proyectos ANID: FONDECYT 1161806, PP18PIC60-1 y PII180003.

REFERENCIAS

Ammirati, J. B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., & Ruiz, S. (2019). The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *109*(5), 1985-1999.

Astini, R. A., & Davila, F. M. (2010). Comment on “The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile” by Rolando Armijo et al.

Bahlburg, H. & Hervé, F. (1997). Geodynamic evolution and tectonostratigraphic terranes of northwestern Argentina and northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 109(7):869–884.

Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The geology of Chile* (pp. 21-114).

Calle-Gardella, D. T., Comte, D., Farías, M., Roecker, S. W., & Rietbrock, A. (2017). Neotectonic Reactivation of Pre-Cenozoic Structures in the Coastal Margin of Central Chile. *AGUFM, 2017*, T23D-0639.

Calle-Gardella, D. T. (2018). Tomografía sísmica pasiva 3D de estructuras corticales en el margen costero de Chile Central: Caracterización en profundidad de la falla de Pichilemu.

Calle-Gardella, D. T., Comte, D., Farías, M., Roecker, S. W., & Rietbrock, A. (2020). Three-dimensional local earthquake tomography of pre-Cenozoic structures in the coastal margin of central Chile: Pichilemu fault system. Aceptado Journal of Seismology.

Charrier, R., Ramos, V. A., Tapia, F., & Sagripanti, L. (2015). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen between 31 and 37 s (Chile and western Argentina). *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1):13–61.

Christensen, N. I. (1970). Composition and evolution of the oceanic crust. *Marine Geology*, 8(2):139–154.

Christensen, N. I. (1996). Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2):3139–3156.

Christensen, N. I. & Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6):9761–9788.

Comte, D., Carrizo, D., Roecker, S., Ortega-Culaciati, F., & Peyrat, S. (2016). Three-dimensional elastic wave speeds in the northern chile subduction zone: variations in hydration in the supraslab mantle. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 207(2):1080–1105.

Comte, D., Farias, M., Roecker, S., & Russo, R. (2019). The nature of the subduction wedge in an erosive margin: Insights from the analysis of aftershocks of the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake beneath the Chilean coastal range. *Earth and Planetary Science Letters*, 520:50–62.

Contreras-Reyes, E., Ruiz, J. A., Becerra, J., Kopp, H., Reichert, C., Maksymowicz, A., Arriagada, C. (2015). Structure and tectonics of the central chilean margin (31°–33° s): Implications for subduction erosion and shallow crustal seismicity. *Geophysical Journal International*, 203(2):776–791.

Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F., & Fock, A. (2010). Crustal-scale structural architecture in central chile based on seismicity and surface geology: Implications for andean mountain building. *Tectonics*, 29(3).

Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., & Pardo, M. (2011). Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, *30*(6).

Fuck, R. A., Neves, B. B. B., & Schobbenhaus, C. (2008). Rodinia descendants in south America. *Precambrian Research*, *160*(1-2), 108-126.

Linkimer, L., Beck, S., Zandt, G., Alvarado, P., Anderson, M., Gilbert, H., & Zhang, H. (2020). Lithospheric structure of the Pampean flat slab region from double-difference tomography. *Journal of South American Earth Sciences*, *97*, 102417.

Navarro-Aránguiz, A. P., Comte, D., Farías, M., Roecker, S. W., & Rietbrock, A. (2019). Seismotectonic Characterization of the Coastal Range in Central Chile: Body Wave Seismic Velocity Anomalies and Their Relationship with Subduction Dynamic. *AGUFM, 2019*, T23E-0480.

Navarro-Aránguiz, A. P. (2020). Caracterización sismotectónica de la Cordillera de la Costa en Chile Central, entre los 32° 30´ S y los 34° S, mediante tomografía sísmica pasiva.

O'Connell, R. J. & Budiansky, B. (1974). Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. *Journal of Geophysical Research*, 79(35):5412–5426.

Oleskevich, D. A., Hyndman, R. D., & Wang, K. (1999). The updip and downdip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia, south Alaska, SW Japan, and Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *104*(B7), 14965-14991.

Ramos, V., Jordan, T., Allmendinger, R. W., Mpodozis, C., Kay, S. M., Cortés, J., & Palma, M. (1986). Paleozoic terranes of the central argentine-chilean andes. *Tectonics*, 5(6):855–880.

Stern, C. R. (1991). Role of subduction erosion in the generation of Andean magmas. *Geology*, *19*(1), 78-81.

Vergara, M., Levi, B., Nystrom, J. O., & Cancino, A. (1995). Jurassic and early cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the coast range of central chile. *Geological Society of America Bulletin*, 107(12):1427–1440.

METODOLOGIA DE ESTUDIO DE ROCAS CALIZAS APLICADA A LA INDUSTRIA CALERA

Negrelli M. M.[a], Arroqui A.[a], Soria T. B.[b] y Castro G. A.[a]

[a]*Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA*
[b]*CONICET, Instituto y Museo de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA*

e-mail: marielnegrelli@gmail.com

RESUMEN

Una de las principales actividades económicas de la provincia de San Juan es la actividad calera, la que tiene una larga trayectoria, debido a la calidad y cantidad de los recursos geológicos (roca caliza) disponibles en Precordillera. Esto ha favorecido la generación de polos industriales de diferentes envergaduras, dedicados a la extracción e industrialización de los materiales carbonáticos para la obtención de la cal y sus derivados. Para ello, las empresas del sector calero focalizan su estudio en controlar específicamente la composición química y la granulometría de la materia prima, sin considerar otros aspectos intrínsecos de la misma; tales como los mineralógicos, texturales y físicos entre otros, aspectos fundamentales que influyen en los procesos de voladura, extracción de cantera, chancado y calcinación para la elaboración de la cal. La situación planteada resalta la gran importancia de alcanzar un alto grado de conocimiento de las propiedades intrínsecas de las calizas y su relación con el comportamiento en las distintas etapas de la producción de la cal, y la posibilidad de optimizar los procesos. Por tal motivo, en este trabajo se presenta una metodología preliminar de investigación, cuya finalidad es la caracterización petrográfica-mineralógica de las diferentes tipologías de calizas y su correlación e interpretación con ensayos normalizados, relacionados a los procesos de elaboración de la cal, como un aporte a la industria calera.

Palabras Clave: Calizas, Caracterización, Cales

INTRODUCCIÓN

Los depósitos carbonáticos (roca caliza) representan una importante fuente de materias primas para un numeroso grupo de actividades industriales, fundamentalmente para la elaboración de la cal. Este producto es requerido en la siderúrgica y en la construcción, que es la de mayor demanda. También se aplica su uso en la industria de la minería metalífera y en otras como la química, papelera, azucarera, y de la pintura.

Particularmente la provincia de San Juan cuenta con estos depósitos disponibles en Precordillera, los cuales geológicamente se formaron por precipitación química en plataforma marina somera bajo condiciones climáticas cálidas. Se manifiestan como una extensa y potente faja de edad Cámbrica – Ordovícica (Bordonaro O., 2003) integrada por cordones de unos 250 km de extensión y anchos de 10 a 30 km, con alturas que no superan los 1.000 a 1.500 m sobre el nivel del mar. Debido a la calidad y cantidad de dichos recursos geológicos, ha favorecido la generación de polos industriales de diferentes envergaduras, lo que ha proporcionado que la actividad calera sea una de sus principales actividades económicas en la provincia.

Cuando se abordan estudios en el ámbito de una cantera de explotación de calizas para la fabricación de cal, las empresas focalizan el análisis de la materia prima primordialmente en lo referido a la composición química (% de OCa) para obtener un producto de una calidad determinada y así poder satisfacer las solicitudes derivadas de diferentes segmentos industriales. A pesar de que la provincia dispone de estos depósitos de alta pureza, las caleras han advertido dificultades que se han ido manifestando en las distintas etapas del proceso (Arroqui et al, 2010).
La cal es una sustancia blanquecina, la cual se obtiene a través de la piedra caliza.
Los procesos involucrados para su elaboración contemplan etapas como "voladura, extracción de cantera, chancado y calcinación", las que tienen otras dependencias, más allá de la química, como la mineralogía, texturas, contenido fosilífero, color, grado de fracturación entre otros.
Todas estas particularidades mencionadas influyen en la producción, por ejemplo, en la fragilidad de la roca, característica física muy importante a considerar en el diseño de voladuras, en la regulación de sistemas de molienda y sobre todo en la calcinación.
Por tal motivo se hace necesario un estudio completo en conjunto de las diferentes calizas (unidades litofaciales) contemplando análisis químicos junto con un examen mineralógico-petrográfico y su correlación e interpretación con ensayos normalizados relacionados a los procesos para la obtención de la cal.
Para ello se presenta una metodología preliminar de investigación en donde se analizan tales características.
Todas estas peculiaridades intrínsecas de las calizas, ya sea en términos texturales (tamaño, forma y distribución de los cristales) composición química (componentes mayoritarios y minoritarios) y porosidad primaria entre otras, le confieren particularidades distintivas que se encuentran íntimamente relacionadas a un ambiente de depositación del carbonato de calcio, conocido como unidad litofacial.
Gran parte de los depósitos carbonaticos de ambientes marinos están conformados por diferentes unidades litofaciales calcáreas.
Para llevar a cabo tal objetivo se consideraron las calizas pertenecientes a la Formación "San Juan", de edad Ordovícico (Kobayashi, 1937), aflorante en la Precordillera Oriental, San Juan. La importancia de esta formación radica en su valor económico, ya que presentan un alto grado de pureza entre el 94 al 99% de CO_3Ca, por las que son destinadas mayoritariamente para la elaboración de la cal.

Ubicación y Accesos al Sector de Estudio

El área de estudio se emplaza en el Departamento Pocito de la provincia de San Juan. Una de las alternativas de acceso es partiendo desde la ciudad de San Juan, 17 km hacia el sur por la Ruta Nacional N°40 hasta su intersección con la Ruta Provincial N°215, para luego dirigirnos hacia el oeste, atravesando la localidad de Villa Aberastain, y por la denominada calle 11 en unos 8 km aproximadamente permitiéndonos arribar al lugar "ver Fig. 1".

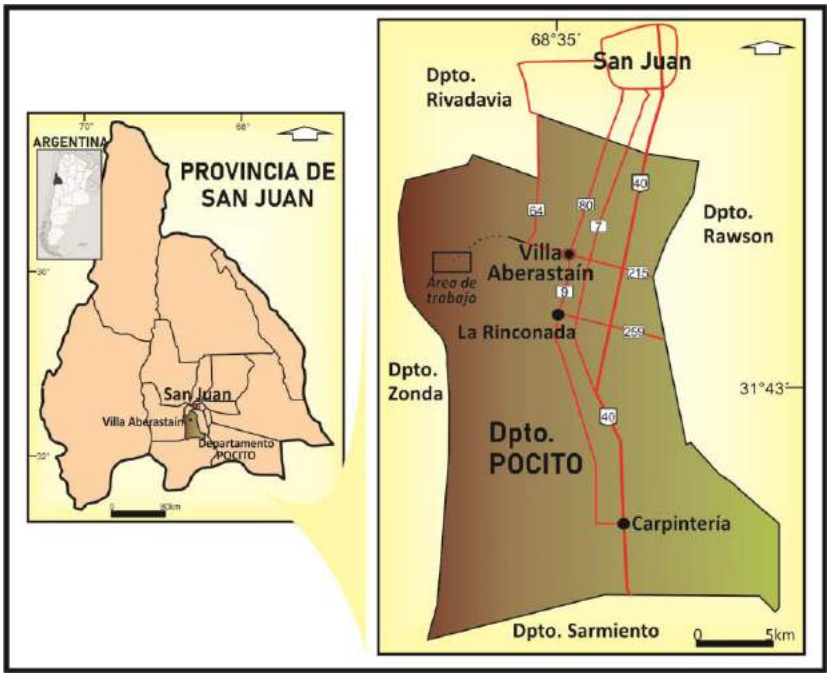


Figura 1. Ubicación del área de trabajo

Se tomó como sitio de muestreo la quebrada del Río Blanco, Sierra Chica de Zonda, sector por presentar niveles carbonáticos aflorantes y de buena accesibilidad “ver Fig. 2”.

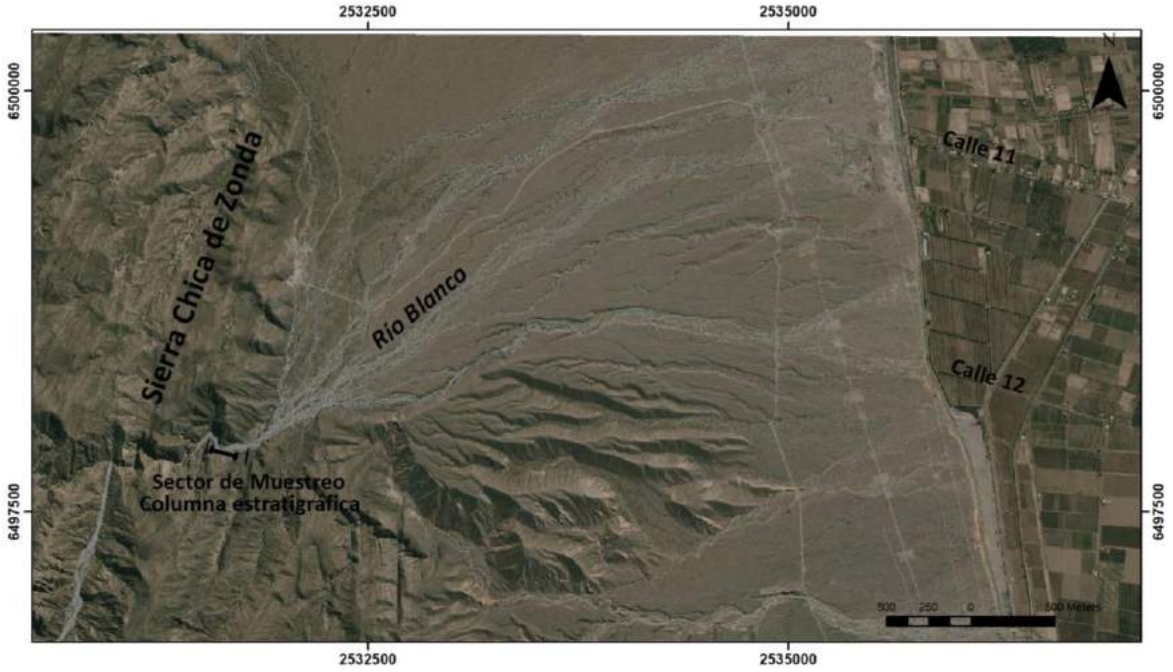


Figura 2. Ubicación del área de trabajo, sitio de muestreo y sector de realización de la columna estratigráfica

MÉTODOS

Se realizaron reconocimientos geológicos en el área de trabajo que permitieron verificar los afloramientos calcáreos y realizar una descripción macroscópica. Se efectuó el levantamiento de una sección estratigráfica en donde se representaron los cambios de facies y la presencia dominante de macrofauna.

Se distinguieron 3 litofacies calcáreas (variedades de calizas) y de las cuales, por cada litofacies identificada, se recolectaron 4 muestras las que fueron sometidas a los diferentes tipos de estudios:

- Ensayos químicos para definir su grado de pureza (determinación de carbonatos, determinaciones composicionales de SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, residuo insoluble, pérdida por calcinación por métodos gravimétricos y volumétricos). Estos análisis fueron llevados a cabo conforme a la norma ASTM C25 – 99.
- Mineralógicos/petrográficos para determinar características composicionales y texturales mediante observaciones en el campo, en muestras de mano, y en pulidos bajo la lupa binocular. Observaciones mediante el empleo del microscopio óptico de polarización, marca Leica modelo DM 2700 P. Análisis por difracción de rayos x, modelo Shimadzu 6100, con radiación Cu Kα (λ=1,540600 Å) y monocromador secundario de grafito, operado a 30 mA y 20 kV en la fuente de alta tensión. Rango de barrido entre 5° y 80°, con tamaños de pasos de 0.05°. Para la interpretación de los minerales se empleó el software Match3, comparando el difractograma experimental con las distintas especies encontradas en la base de datos COD (Cristalography Open Database).
- Ensayos normalizados como el de densidad, mediante el picnómetro de helio, y el de compresión simple, los que permitirán evaluar y correlacionar el comportamiento físico-mecánico de las litofacies con los parámetros petrográficos estudiados anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sobre esta formación calcárea se reconocieron tres litofacies identificadas como PLA, PLB y PLC, la cual se procedió a su levantamiento de una columna estratigráfica “ver Fig. 3”

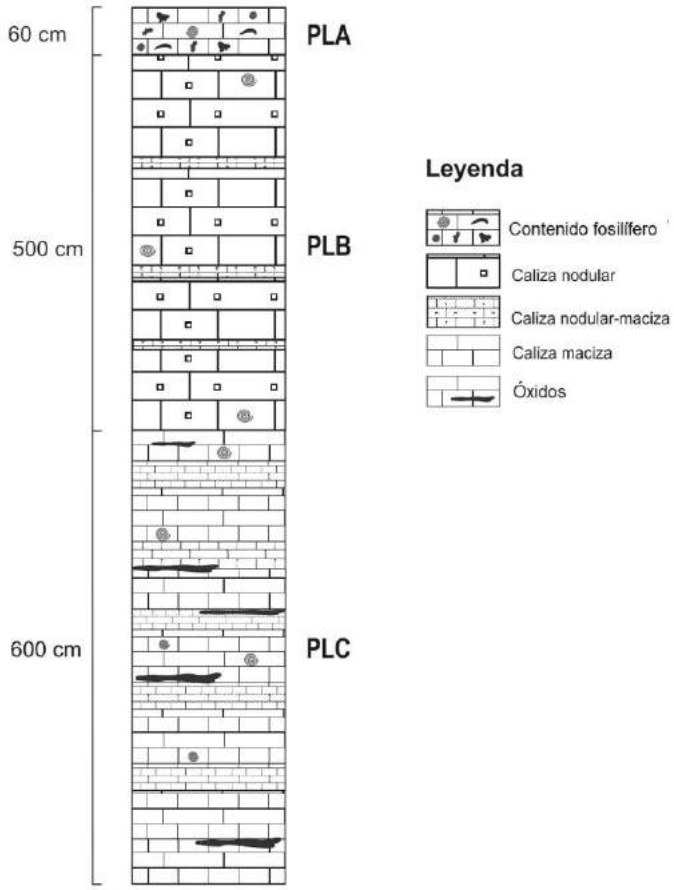


Figura 3. Sección estratigráfica de la Formación San Juan y distribución vertical de las especies en la quebrada del Río Blanco

Para los estudios de caracterización mineralógica/petrográfica de las litofacies identificadas, se categorizó algunas de las variables analizadas acorde a la Tabla I.

Tabla I. Valores de referencia

Contenido en proporciones	
Muy Alto	>75%
Alto	50 – 75%
Medio	25 – 50%
Bajo	10 – 25%
Muy bajo	<10%

Para lograr tal objetivo, se confecciono por cada litofacies un pulido y su correspondiente sección delgada, las que fueron analizadas considerando diez campos de observación a la lupa binocular y al microscopio de polarización. Dichos estudios se exponen en la Tabla II.

Tabla II. Estudio de las variables intrínsecas correspondientes a cada una de las litofacies

Variables consideradas	**PLA**	**PLB**	**PLC**
Observaciones de campo (ver Fotog. 1, 2 y 3)			
Litología	Caliza, con fuerte efervescencia al agregado de ClH	Caliza, con fuerte efervescencia al agregado de ClH	Caliza, con fuerte efervescencia al agregado de ClH
Color (1) **(corte fresco)**	N5 Medium Gray	N7 Light Gray	N6 Medium Light Gray
Estructura	Compacta, maciza,	Compacta nodular	Compacta
Contenido y tamaño de fósiles	Bajo - 4 por m^2 (de hasta 10 cm de diámetro mayor)	Bajo – 3 a 2 por m^2 (de hasta 2 cm de diámetro mayor)	Muy Bajo - 1 por m^2 (de hasta 1 cm de diámetro mayor)
Densidad y espesor de venillas de calcita	Baja - 2 por m^2 (Espesor 2 a 3 mm)	Baja – 3 a 4 por m^2 (Espesor 3 a 5 mm)	Baja – 5 a 6 por m^2 (Espesor 3 a 5 mm)
Densidad y espesor de venillas de otro material	Muy Bajo 1 por m^2 de venillas de óxidos (Espesor 1 a 2 mm)	Bajo – 2 a 3 por m^2 de venillas de óxidos (Espesor 3 a 5 mm)	Baja – 6 por m^2 de venillas de óxidos (Espesor 3 a 5 mm)
Observación en pulidos			
Textura	Cristalina	Cristalina	Cristalina
Contenido de bioclastos	Alto (diversos tamaños)	Bajo	No se observaron
Contenido de venillas de calcita	Bajo (Espesor hasta 1 mm)	Bajo (Espesor hasta 1 mm)	Bajo (Espesor hasta 2 mm)
Contenido de venillas de otro material	Bajo (venillas de óxidos)	Bajo (venillas de óxidos)	Bajo (venillas de óxidos)
Componentes no carbonáticos	No se observaron	motas de material pelítico clástico	Motas de cuarzo
Observaciones al microscopio óptico (ver Fotog. 4, 5 y 6)			
Granos carbonatados (constituyentes Aloquímicos)			
Granos esqueletales (fósiles)	Bajo (valvas de braquiópodos, trilobites y artejos de crinoideos)	Bajo (valvas de braquiópodos y trilobites)	Muy Bajo (restos de bivalvos)
Granos no	Muy Alto	Bajo	No se observaron

 ISBN 978-987-1323-66-1

esqueléticos (ooides, peloides, litoclastos)	(peloides)	(peloides y probables pellets)	
Material intercristalino (constituyentes Ortoquímicos)			
Contenidos de micrita (M) y esparita (E)	M>E M: 70% E: 30%	M>E M: 75% E: 25%	M>E M: 75% E: 25%
Rango del tamaño cristal de esparita	50 a 100 µm	25 a 50 µm	10 a 25 µm
Fenómenos de dolomitización			
Evidencia de procesos de dolomitización	Muy Bajo	No se observaron	Bajo
Tamaño promedio del cristal Dolomita	50 µm	No se observaron	200 µm
Componentes no carbonaticos			
Contenido de partículas terrígenas (fragmentos de roca, cuarzos, feldespatos, arcillas, óxidos)	Muy Bajo (Óxidos)	Muy Bajo (Óxidos)	Bajo (óxidos)
Nombre roca. (Folk, 1959)	Packstone Peloideal	Wasckstone	Wasckstone
Análisis con Difracción de Rayos x			
Fase mineral dominante (2)	Calcita (COD 96-900-0575)	Calcita (COD 96-900-0575)	Calcita (COD 96-900-0575)
Fase mineral subordinada (2)	Cuarzo (COD 96-230-0371)	Cuarzo (COD 96-230-0371)	Cuarzo (COD 96-230-0371)

1. De acuerdo a: "Rock Color Chart, The Rock Color Chart" Committee, Geological Society of America, 1980.
2. De acuerdo a: Base de datos COD (Cristalography Open Database)



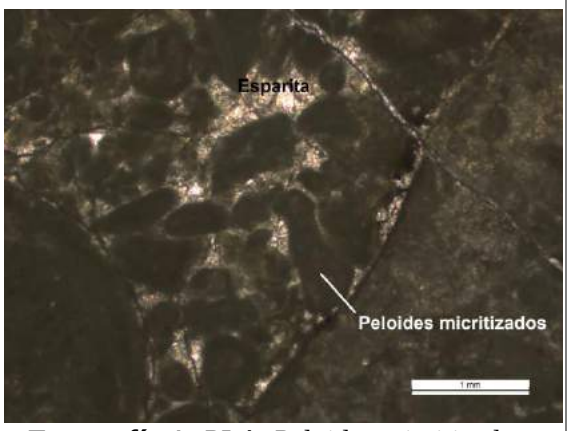
Fotografía 1. PLA, caliza compacta



Fotografía 2. PLB, caliza nodular



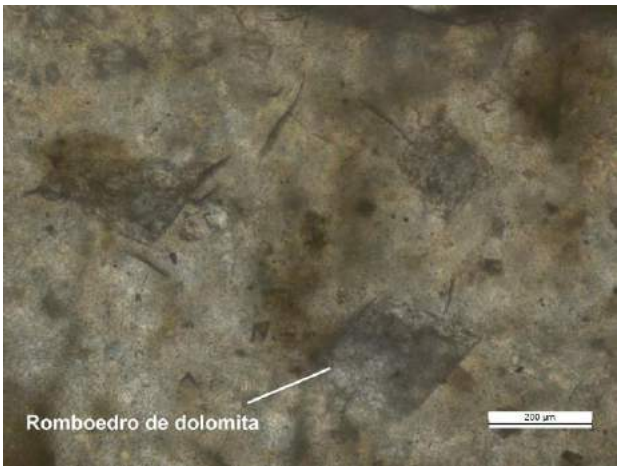
Fotografía 3. PLC, caliza compacta con sílice



Fotografía 4. PLA, Peloides micritizados ligados con cemento esparítico



Fotografía 5. PLB, Peloides micritizados ligados con cemento esparítico. Manchas de óxidos y estilolítos



Fotografía 6. PLC, Evidencia de procesos de dolomitización

Para los análisis químicos y físicos-mecánicos se consideraron cuatro muestras por cada una de las litofacies reconocidas; en la Tabla III y Tabla IV se exponen los resultados promedios de cada una de ellas.

Tabla III. Análisis químico de las litofacies identificadas

Variables consideradas	**PLA**	**PLB**	**PLC**
Análisis Químicos promedios			
CaO %	52,26	50,25	43,71
MgO %	0,56	0,557	0,625
R. In. %	0,62	1,58	1,66
SiO_2 %	2,27	4,77	16,98
R_2O_3 %	1,13	0,95	0,58
Fe_2O_3 %	0,91	0,17	0,185
Al_2O_3 %	0,74	0,78	0,40
PPC %	42,745	41,08	36,02
Pa 105ºC %	0,18	0,20	0,195

Tabla IV. Análisis físicos de las litofacies identificadas

Variables consideradas	**PLA**	**PLB**	**PLC**
Análisis Físicos promedios			
Compresión simple Kg/ cm^2	481,13	487,665	525,555
Densidad Absoluta g/cm^3	2.7164	2.7301	2.7269
Densidad Aparente g/cm^3	2.6781	2,6652	2.6420

En base al análisis de las variables consideradas (aspectos naturales) propias de la materia prima calcárea, permitirán junto con los resultados de los ensayos normalizados la realización de una correlación cuyo objeto es poder interpretar cuál de las variables gobierna en los procesos de la elaboración de la cal.

CONCLUSIONES

- Se diferenciaron 3 litofacies calcáreas en el área de la quebrada del Río Blanco denominadas PLA, PLB y PLC, donde la muestra PLA es la que presentó mejor aptitud química para la elaboración de cales, con un contenido de CO_3Ca de 95,00%. El resto de litofacies, presenta un contenido de sílice elevado para ser considerada como materia prima carbonática en la industria de la cal.
- Se observa preliminarmente una relación entre el mayor contenido de sílice con las texturas más finas, o menor desarrollo de cristales esparíticos, evidenciado en las muestras PLB y PLC.
- Las muestras PLB y PLC, con mayor contenido de sílice, evidencian a su vez un contenido de óxido de hierro menor, respecto de la muestra PLA. Se advierte el contraste de coloración, de la muestra a microscopio.

- La mayor resistencia a la compresión simple de las muestras muestra una relación preliminar directa conforme el aumento del contenido de sílice.
- Con respecto a la densidad, los valores obtenidos no exponen variaciones significativas en las diferentes muestras.
- Una vez establecidas en detalle las características de las distintas litofacies en los frentes de cantera en explotación, es posible zonificar las canteras conforme el comportamiento de la materia prima a los distintos ensayos realizados. De esta forma se puede por ejemplo disminuir la carga de explosivos según sectores, destinar determinados sectores de la cantera a distintos clientes conforme las aplicaciones y sus requerimientos químicos, prever la mayor o menor necesidad de energía, conforme las características de la calcinación de la roca. Esta variable no ha sido aún abordada. Para ello es necesario contar con un mayor número de muestras que permita el tratamiento estadístico de los datos, a fin de validar metodología de estudio propuesta.
- Estudios de estas características permiten mejorar el proceso de la industrialización de la cal; y del mismo modo que contribuya a la reducción en la generación de escombreras, haciendo un buen uso del recurso, minimizando a su vez el impacto sobre el medio ambiente.

REFERENCIAS

Arroqui Langer, A. Mestre, A. y Bordonaro, O. Caracterización Petrológica de Rocas Carbonáticas de la Precordillera de San Juan Argentina, Base para la Implementación de Normas de Calidad Internacional en la Producción de Cales. XV Congreso Peruano de Geología. Cusco, Publicación especial N° 9. Resúmenes Extendidos, (2010).

Bordonaro, O.L. Review of the Cambrian stratigraphy of the Argentine Precordillera. *Geologica Acta* 1:11 - 21. (2003)

Folk R.L. Practical petrography classification of limestones, Springer Verlag, Berlín, 633, (1959).

Kobayashi, T. The Cambro-Ordovician shelly faunas of South America. Journal of the Faculty of Science, Imperial University of Tokyo, section 2, 4:369 - 522 (1937).

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD CALERA. ESTUDIO PRELIMINAR COMPARATIVO EN LOS DEPARTAMENTOS JÁCHAL – ALBARDÓN, PROVINCIA DE SAN JUAN.

Neyra G., Negrelli M. M., Soria M. V., Mendéz M. J., Ramirez M. S.

Instituto de Investigaciones Mineras y Departamento de Ingeniería de Minas
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. ARGENTINA

e-mail: gildaneyra@gmail.com

RESUMEN

La provincia de San Juan se caracteriza por presentar grandes volúmenes de material calcáreo (carbonatos de calcio y magnesio) de muy buena calidad. Estos materiales representan una importante fuente de materias primas para un numeroso grupo de actividades industriales. Una de las áreas de significancia económica para la región la constituyen el Sector Norte, en la Sierra de San Roque en el Departamento Jáchal, como así también el Sector Centro, en la Sierra de Villicum, Distrito Villicum, del Departamento Albardón. Estos polos caleros tienen la particularidad de encontrarse sobre afloramientos que pertenecen a la misma edad geológica. Sin embargo, en su evolución histórica presentan diferencias notables en cuanto a su envergadura de explotación, el tipo y cantidad de productos y las características estratigráficas de las formaciones que la constituyen. Por tal motivo el propósito de este estudio es indagar sobre aquellos aspectos que den cuenta del crecimiento diferencial que han tenido estas áreas a lo largo del tiempo ya que constituyen actividades de gran influencia en las modificaciones de las configuraciones espaciales. A través del análisis de las mismas, se podrán evaluar los cambios y la evolución de las dos áreas pilotos. En éste primer análisis se advierte que ambos polos que se encuentran sobre Ruta Nacional Nº 40, poseen algunas diferencias, entre ellas las de conectividad que podrían influir en el análisis de los procesos de producción, extracción y comercialización de los productos derivados. Se advierte así que en el sector Norte, la actividad minera no presenta un crecimiento tan significativo en comparación con el sector Central y esto se ve representado en la identificación de las variaciones que a nivel local se dan de sus configuraciones espaciales.

Palabras clave: Actividad calera, evolución, variaciones espaciales.

INTRODUCCIÓN

La explotación de los materiales carbonáticos (calizas y dolomías) es una actividad extractiva de gran incidencia en la provincia de San Juan y sus depósitos representan las mayores reservas.

Las rocas carbonáticas precordilleranas poseen alta potencialidad geológico-minera dada por la calidad y cantidad del recurso, por lo que las hace una importante fuente para las diferentes industrias.

Geológicamente estos depósitos carbonáticos se manifiestan como una extensa y potente faja integrada por cordones de unos 250 km de extensión y espesores de bancos de 10 a 30 km, cuyas alturas no superan los 1.000 a 1.500 m sobre el nivel del mar.

La provincia tiene una larga trayectoria en cuanto al contexto vinculado al sector de minerales no metalíferos y rocas de aplicación, disponibles en Precordillera.
Existen tres polos de explotación de calizas y dolomías: sector norte, en la Cerro de San Roque, distrito San Roque, departamento Jáchal; sector centro, en la Sierra de Villicum, distrito Villicum, departamento Albardón; sector sur, distrito Los Berros, departamento Sarmiento (ver Fig. 1).

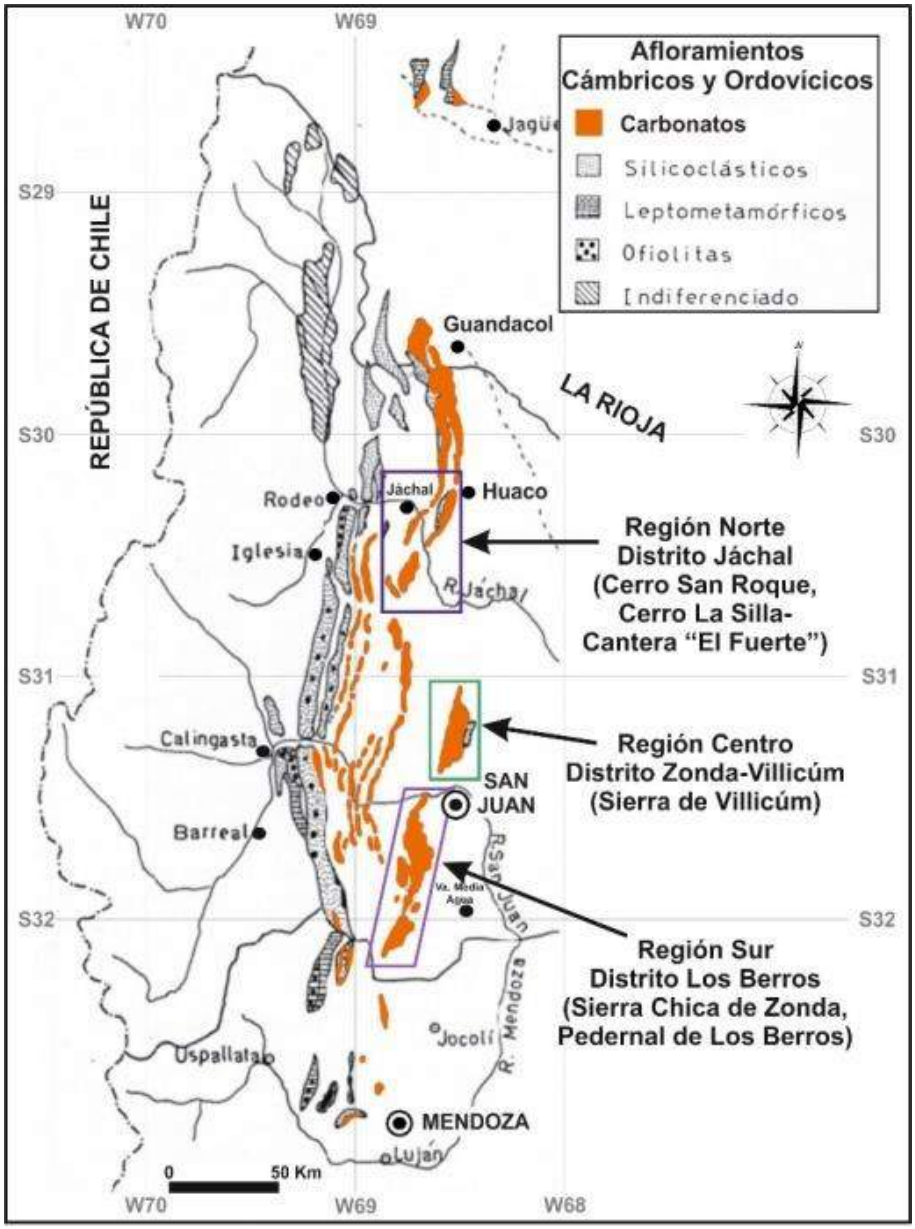


Figura 1. Distribución de los afloramientos carbonáticos Cambro-Ordovícicos de la Precordillera Sanjuanina y las principales regiones donde se explota. Fuente: modificado de Bordonaro, 1999.

Estos polos caleros tienen la particularidad de pertenecer a la misma edad geológica, sin embargo, en su evolución histórica presentan diferencias notables en cuanto a su envergadura de explotación, el tipo y cantidad de productos, las características geológicas de las formaciones que lo constituyen y por ende las transformaciones

territoriales producidas. Además, es de destacar que ambas áreas de referencia son explotadas actualmente por empresas multinacionales, SIBELCO, de origen belga, en Albardón y Compañía Minera del Pacífico, de capitales chilenos.
De manera específica en el departamento Sarmiento este grupo de investigación ha encarado diversos estudios tales como el ambiental, minero, análisis físico-químico de los materiales calcáreos y residuales, líneas de investigación enfocadas en el paisaje minero y la valoración del impacto ambiental producido por la actividad calera.
Por esta razón, surge la necesidad de extender dichas investigaciones a los demás sectores carbonáticos antes mencionados, ya que representan emplazamientos calcáreos de gran significancia económica para la región, además, para que en el futuro éstos estudios permitan elaborar un panorama integral de la realidad de la actividad extractiva provincial, considerando no solo al aspecto geológico-minero sino también los referidos a las estructuras y dimensiones del emplazamiento del proyecto minero, modificaciones territoriales, entre otros.
Como parte del efecto multiplicador de la minería, el aumento de la demanda de productos mineros tiene como consecuencia directa el crecimiento de las actividades de producción. Asimismo, estas actividades suelen tener influencia en la evolución de los núcleos urbanos, las características socioeconómicas vinculadas al entorno y cambios a nivel espacial y ambiental en la zona de influencia directa a dicho emplazamiento.
En esta primera instancia se efectuará un estudio preliminar comparativo, de los sectores pertenecientes al departamento Jáchal y Albardón, mediante el análisis de las configuraciones espaciales a partir de la interpretación temporal de imágenes satelitales.
Por lo expuesto, se pone en evidencia la necesidad de estudiar la evolución de la actividad extractiva, su efecto actual a través del conocimiento del territorio, definir cómo está siendo modificado por la minería extractiva no metalífera, en particular la calcárea, en un proceso comparativo de dos zonas que son representativas del sector centro y norte de la provincia de San Juan.

Geología Regional

Dentro del marco geológico regional, los depósitos calcáreos (calizas y dolomías) se localizan dentro de la denominada Provincia Geológica de Precordillera. La misma posee una dirección norte-sur y se ubica en toda la franja central del territorio sanjuanino. Sobre la base de sus características litológicas y estructurales esta unidad fue dividida en tres subunidades: Occidental (Baldis *et. al.*, 1982), Central (Baldis y Chebli, 1969) y Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981).
Los sectores de estudio se corresponden a la Precordillera Central y Oriental, subunidades que, desde el punto de vista estratigráfico, se caracterizan por una secuencia sedimentaria en facies carbonáticas y terrígenas, de edad Cámbrica – Ordovícica (Bordonaro O., 2003). Esta secuencia posee características sedimentológicas, estratigráficas y paleontológicas distintivas y un ambiente típico de plataforma interna somera, bajo condiciones climáticas cálidas (Bordonaro, 1990).
Los yacimientos carbonáticos, en Jáchal (sector norte) están localizados principalmente en el Cerro de San Roque. Corresponden a afloramientos de la Formación San Juan (Ordovícico inferior), los cuales se disponen en bancos delgados y gruesos, con potencias que oscilan entre 30 y 130 m, intercalados con capas de pedernal a manera de franjas. La estructura dominante de la sierra presenta un rumbo meridiano, con vergencia oriental.

En la sierra de Villicum (sector central) del departamento Albardón, la secuencia paleozoica se inicia con las calizas y dolomías cámbricas del Grupo Marquesado (Bordonaro, 1980; Ramos y Vujovich, 2000) sobre las que se apoyan las calizas ordovícicas de la Formación San Juan (Kobayashi, 1937). Los bancos de calizas que se explotan son de grano muy fino, con espesores que van desde los 0,5 a 1 metro. Con respecto a las dolomías son de colores claros, interestratificados en bancos de 1 a 3 m de espesor y presenta algunas intercalaciones de chert en los niveles inferiores de la secuencia. Estructuralmente la sierra está corrida y plegada con vergencia hacia el oeste.

Calizas y Dolomías en la Industria Minera

Estas rocas son motivo de una importante actividad extractiva y de industrialización, de la que se obtienen los productos como cal viva, cal hidratada y carbonato de calcio precipitado, productos requeridos por innumerables industrias. La cal es utilizada en las industrias de la construcción, minera, siderúrgica, química, del petróleo, agricultura, en las papeleras, azucareras, curtiembres, potabilización del agua, entre otras. Esto explica su demanda y expansión creciente, que permite inferir una mayor producción a mediano y largo plazo, limitada por la disponibilidad de energía.

La industria de la cal en 2016 ha abastecido el 75% del mercado chileno, lo que representa alrededor de 394,5 mil toneladas de dicho producto. Existen alrededor de 25 caleras en operación y 3 empresas responsables de más del 50% de la producción: SIBELCO ("ex Minera TEA"), Compañía Minera del Pacífico (estas dos ubicadas en los polos caleros en estudio) y CEFAS (Distrito calero Los Berros). La producción de cal se vio fuertemente impulsada por los requerimientos de la industria de la construcción y especialmente potenciada por el desarrollo de los proyectos Veladero, Casposo y Gualcamayo, e inclusive con anterioridad a estos proyectos por el envío a Bajo de la Alumbrera en Catamarca (que inició operaciones en 1998) y la sostenida demanda por parte de las minas de Chile (Ministerio de Energía y Minería, 2018, pág. 20).

La actividad minera y en particular la industria dedicada a la explotación de productos calcáreos, hace uso del territorio como fuente de materia prima, como soporte de las actividades y como receptor de desechos, reconociendo esto cambios en el territorio a lo largo de su evolución histórica.

Ubicación y Accesos de los Sectores de Estudios (norte y centro)

El presente trabajo se desarrolló en dos áreas de estudio, las que fueron consideradas como áreas pilotos. La primera pertenece al departamento Jáchal y la segunda al departamento Albardón (ver Fig. 2).

El departamento Jáchal se ubica en el norte de la provincia de San Juan y se accede al mismo desde la ciudad capital sanjuanina, hacia el norte por Ruta Nacional Nº 40, a unos 157 km. Parte de los afloramientos calcáreos se emplazan en el cerro "San Roque" accediendo a este a unos 7 km al sur de San José de Jáchal, en la localidad homónima al cerro.

La otra área contemplada se encuentra en el departamento Albardón. Los afloramientos carbonaticos se manifiestan en el flanco austral de la sierra de Villicum, ubicada a 45 km al norte de la capital sanjuanina, accediendo a la misma por Ruta Nacional Nº 40.

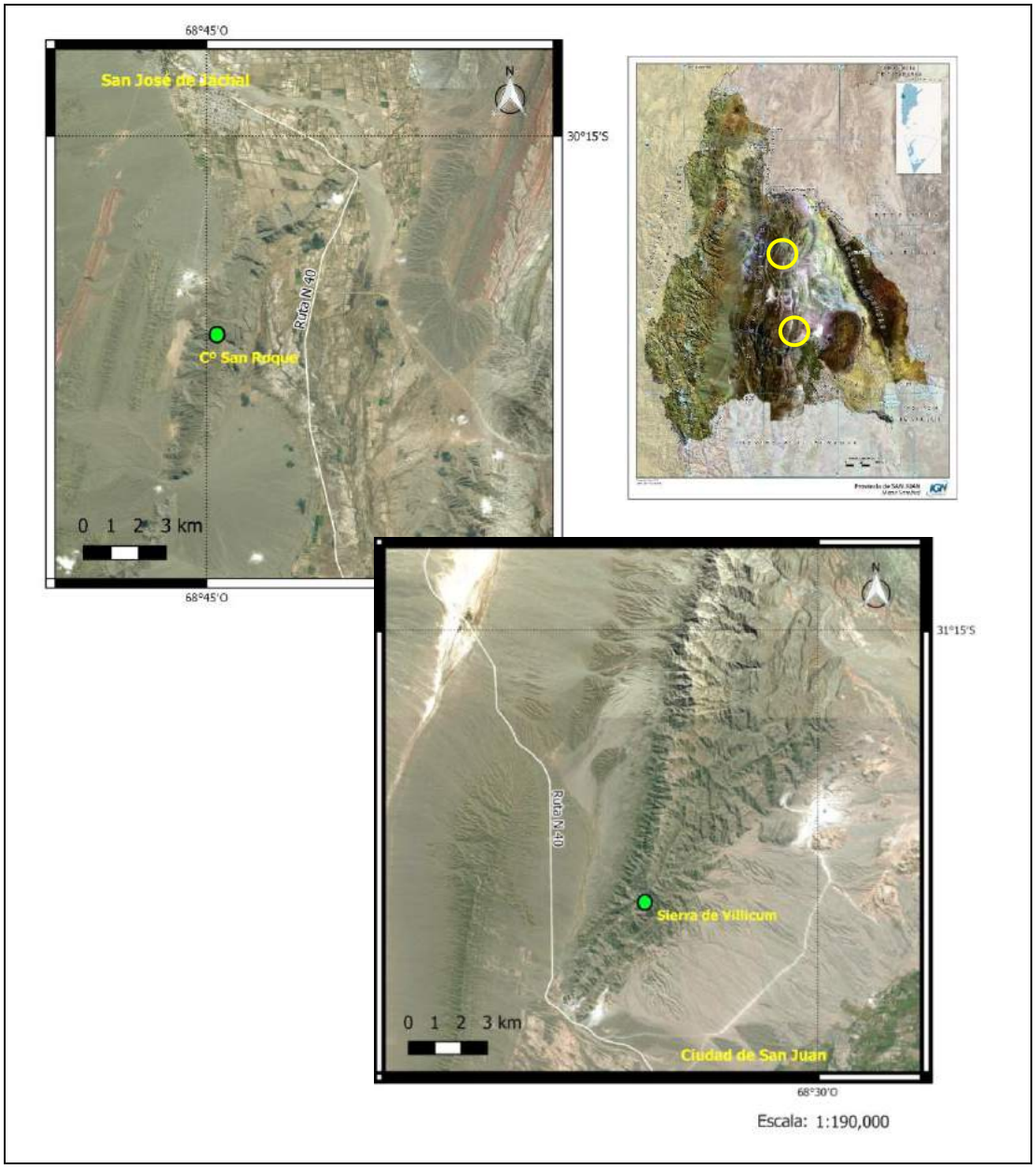


Figura 2. Ubicación de las áreas de estudio. Fuente: Elaboración en base a imagen del Google earth.

Antecedentes Mineros de los Sectores de Estudio

En el departamento Jáchal inicialmente el método empleado para la industrialización de la caliza fue mediante los denominados “hornos criollos” u “hornos artesanales”. Estos fueron trabajados por grupos familiares, como una fuente económica de subsistencia, los que estuvieron emplazados en el borde NE del Cerro de San Roque, por proximidad al núcleo urbano.

La actividad calera no está muy desarrollada en términos relativos a otros territorios provinciales. En la actualidad, el principal yacimiento es “El Refugio” (hoy como Compañía Minera El Pacífico - CMP), emplazado en el borde occidental del Cerro San

Roque, industria calera que nació en la década de 1940, en donde las leyes promovieron la radicación de fábricas en el interior de la provincia, esto con el fin de explotar la minería no metalífera. Abasteció en aquellos momentos el 42 % de las calizas y dolomitas necesarios para la resultante de fundentes siderúrgicos demandados por la Sociedad Mixta Siderúrgica Argentina (SOMISA), saliendo de Jáchal más de 5.000 toneladas de cales vivas e hidratadas[1]. El 1996 el grupo chileno Cementos Bío Bío SA, en conjunto con Soprocal Calerías e Industrias SA, crean la sociedad de Inversiones San Juan S.A. y adquieren las instalaciones y minas de la Compañía Minera del Pacífico S.A., ubicada en Argentina, siendo la más antigua calera de capitales foráneos[2].
Actualmente, CMP es la empresa calera de mayor escala en el departamento. La producción para el año 2016 fue de 60.000 toneladas, siendo este volumen levemente inferior al año anterior (61.000 toneladas) pero superior a la de 2014 (55.000 toneladas). Hoy en día emplea 50 personas en forma directa, de las cuales el 80% son de Jáchal y el 20% en forma indirecta. El 100% de sus principales proveedores son empresas de origen sanjuanino (Subsecretaría de Planificación Territorial, 2018, pág. 164).
Con respecto al Distrito Villicum, la explotación de los materiales calcáreos en la sierra homónima se registra a partir de 1945. Se explotaban alrededor de 18.000 toneladas anuales (Angelelli et al., 1980). Al presente la empresa calera El Volcán es la que opera en el área, perteneciente a Unimin Corporation, subsidiaria de SIBELCO[3].
Mas del 1% de la población total de Albardón trabaja en relación directa con la Industria Minera Calera y se encuentran empleados en forma permanente en las empresas del ramo. Otro 2% está vinculado indirectamente mediante trabajos y servicios. Es decir que más de 600 personas (del departamento de Albardón) Están vinculadas a la actividad extractiva y comercial. Entre el 85 y 90 % del personal de las plantas caleras residen en la localidad.[3]

Metodología de Trabajo

La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo permitirá un estudio integral a nivel de multiescala, desde un análisis particular de las áreas identificadas como pilotos a una visión regional donde se pueda reconocer las particularidades del territorio donde se encuentran insertas las áreas en estudio. Poder realizar la comparación sobre las características y condicionantes particulares de cada una de ellas permite generar un estudio sobre el cual se puedan sacar conclusiones a partir de sus diferencias, contrastes o similitudes, pudiendo reconocer comportamientos tanto a nivel regional como local de esta actividad.
La utilización de la teledetección se corresponde a una de las etapas centrales para la concreción de los objetivos planteados y ocupa varias etapas del diseño metodológico. Por una parte, las imágenes de alta resolución espacial disponible en servidores, permite la identificación, interpretación y cartografía a nivel de detalle de las explotaciones mineras de las áreas definidas como pilotos, mediante observación de imágenes de satelitales disponibles desde la década del 2000 hasta la actualidad. Posteriormente, para interpretar la relación de estos sectores con su entorno se abordó en términos de Configuraciones Espaciales a través de la metodología propuesta por Forman y Godron

[1]https://www.diariodecuyo.com.ar/columnasdeopinion/El-Refugio-industria-pilar-de-la-economia-jachallera-20180324-0050.html
[2]https://radioestacionminera.com.ar/caleras-en-san-juan/
[3]http://miningpress.com/nota/300580/caleras-san-juan-crece-presencia-extranjera-y-concentracion-hensel-cambiar-de-politicas-las-inversiones.

(1986) citado por Aguilo *et al* (1995). Este análisis permitió advertir las diferencias territoriales que se presentan en el emplazamiento de las respectivas explotaciones calcáreas. La disposición espacial de los diferentes elementos permite comparar, desde un punto de vista territorial, las áreas pilotos en períodos diferentes.
De esta manera se podrá obtener una visión actual sobre el territorio como el resultado de complejas interacciones, no sólo producto de dinámicas naturales sino también de los efectos antropogénicos ante la presencia por los recursos carbonáticos que éste ofrece.

Resultados y Discusión

Análisis temporal

El análisis temporal de los últimos 15 años muestra una diferencia significativa entre los sectores considerados (ver Fig. 3). La interpretación de las imágenes de satélite permite inferir algunas observaciones preliminares relacionadas a la identificación de las áreas con actividad minera, la superficie ocupada por las explotaciones y los sitios ocupados por los residuos mineros, entre algunos de los aspectos a valorar.
Considerando que el sector de la industria no metalífera ha ido creciendo a una tasa anual del 22,68% en el periodo 1995-2015 (Ministerio de Energía y Minería, 2018, pág. 32) se puede observar en el mismo lapso de tiempo (2004 al 2019), la variabilidad de un sector piloto con respecto al otro.
En términos generales, la explotación del material calcáreo en estas áreas se realiza a cielo abierto con la apertura de canteras y para el arranque del mineral, se ejecuta distribuyendo las perforaciones según la experiencia de cada capataz o encargado.

- A partir de la década de los 90´ la producción de cal se vio fuertemente impulsada por los requerimientos de la industria de la construcción, también por el envío a Bajo de la Alumbrera en Catamarca (que inició operaciones en 1998) y la sostenida demanda por parte de las minas de Chile, lo que permitió al sector calero de Jáchal la implementación de tecnologías más modernas (horno de doble cuba con capacidad para producir de 150 a 350 tn/día de cal, instalado en la planta ubicada en las inmediaciones de la cantera).
  De igual manera, en el sector Central (Albardón), la actividad extractiva también adquiere significancia especialmente sobre el faldeo oriental de la sierra de Villicum, por exponer sus bancos calcáreos los de mayor potencialidad.
- Posterior al 2009, año de recesión en el país, entre el 2011-2015, el sector minero en la provincia tuvo un crecimiento importante. En Jáchal la actividad calera para este período permanece estable con algunos impulsos en su producción debido a la construcción de nuevos planes de viviendas en la región.
  En el sector Central, la explotación de las canteras adquiere un auge mayor, especialmente potenciado por el desarrollo de los proyectos metalíferos, que requieren de la cal como un insumo básico, como así también debido a la construcción del autódromo y el parque industrial, continuando en el abastecimiento para la industria siderúrgica y para tratamiento de aguas. Este auge, se observa reflejado en las imágenes satelitales por el avance progresivo de la actividad extractiva en el extremo sur de la Sierra de Villicum.
  Tanto en Jáchal como en Albardón, si bien como consecuencia de esta actividad se van generando volúmenes importantes de residuos mineros, para este periodo se ha

podido constatar mediante las imágenes satelitales un leve ordenamiento de los acopios, probablemente fomentado por la Ley 24585/95 de Protección Ambiental para la actividad minera.

- Para el periodo 2018-2019 Jáchal continúa manteniendo su línea de rendimiento calero, a pesar que su único medio de transporte de la producción es por carretera, mientras que en los demás núcleos (ejemplo en el área de Los Berros), se combinan carretera con el ferroviario. Hasta el momento la materialización del Corredor Bioceánico Paso de Agua Negra, sobre Ruta Nacional Nº 150, que pasa por el departamento norteño, no ha tenido impacto en esta actividad.
  En el área de Albardón, la actividad extractiva continua con un crecimiento muy notorio en comparación con el sector Norte, aproximadamente 90 tn/día, a pesar que una de las mayores preocupaciones que arrastran los caleros desde el 2017 es el tema del combustible (relación de costos gas y carbón)[4]. La mayor parte de la producción se destina al mercado chileno, en donde la cal se la utiliza preferentemente en minería.

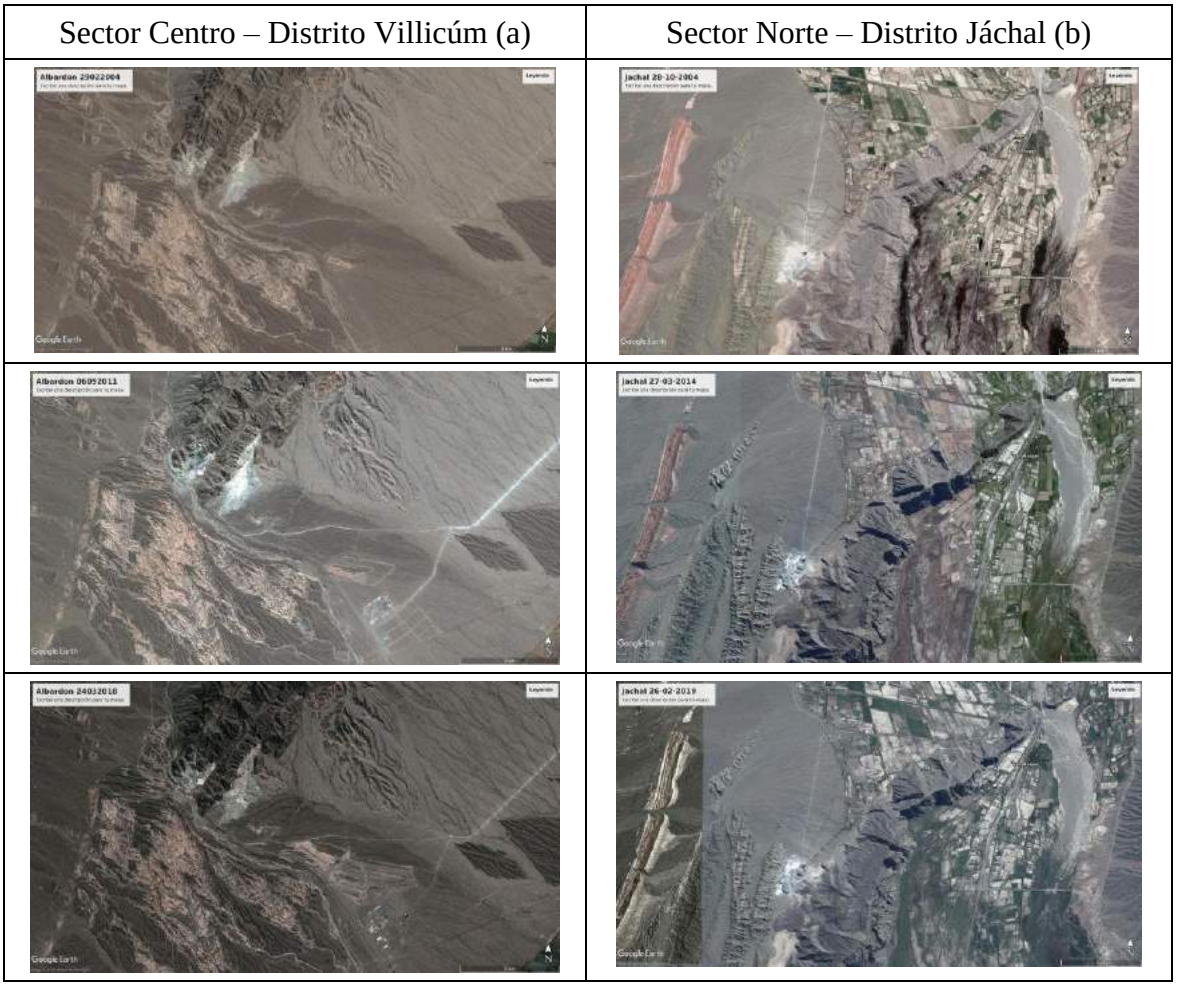


Figura 3. a. Sierra de Villicum. **b.** Cerro San Roque. Fuente: Imágenes provistas por el google earth.

[4] https://diariolaventana.com/articulo.php?id=207625

Configuraciones Territoriales

Para lograr interpretar las diferencias territoriales entre los polos identificados se considera el análisis de las configuraciones espaciales (ver Fig. 4) propuestas por Forman y Godron, citado por Aguilo et al (1995). Estas son identificadas, con el doble significado ecológico y visual, considerando los siguientes tipos de elementos o configuraciones espaciales: manchas; corredores y matriz.

- Manchas: Son superficies no lineales que se diferencian de lo que las rodea por su aspecto. En ambos territorios estas manchas están asociadas a tres tipos de usos del suelo: asentamiento poblacional, actividad minera y zonas cultivadas (zonas rurales).
- Corredores: se entiende por corredores aquellas superficies del terreno estrechas y alargadas. En las zonas de estudio se asocian tanto a las vías de comunicación y pueden clasificarse en vías de carácter primario, rutas y accesos principales, y de carácter secundario, las calles internas o de uso minero.
- Matriz: La matriz es el elemento del paisaje que ocupa una mayor superficie y bordea a la mancha. Juega el papel dominante en el funcionamiento del paisaje. En la zona está representada a nivel regional por las bajadas pedemontanas, abanicos aluviales y relieves positivos.

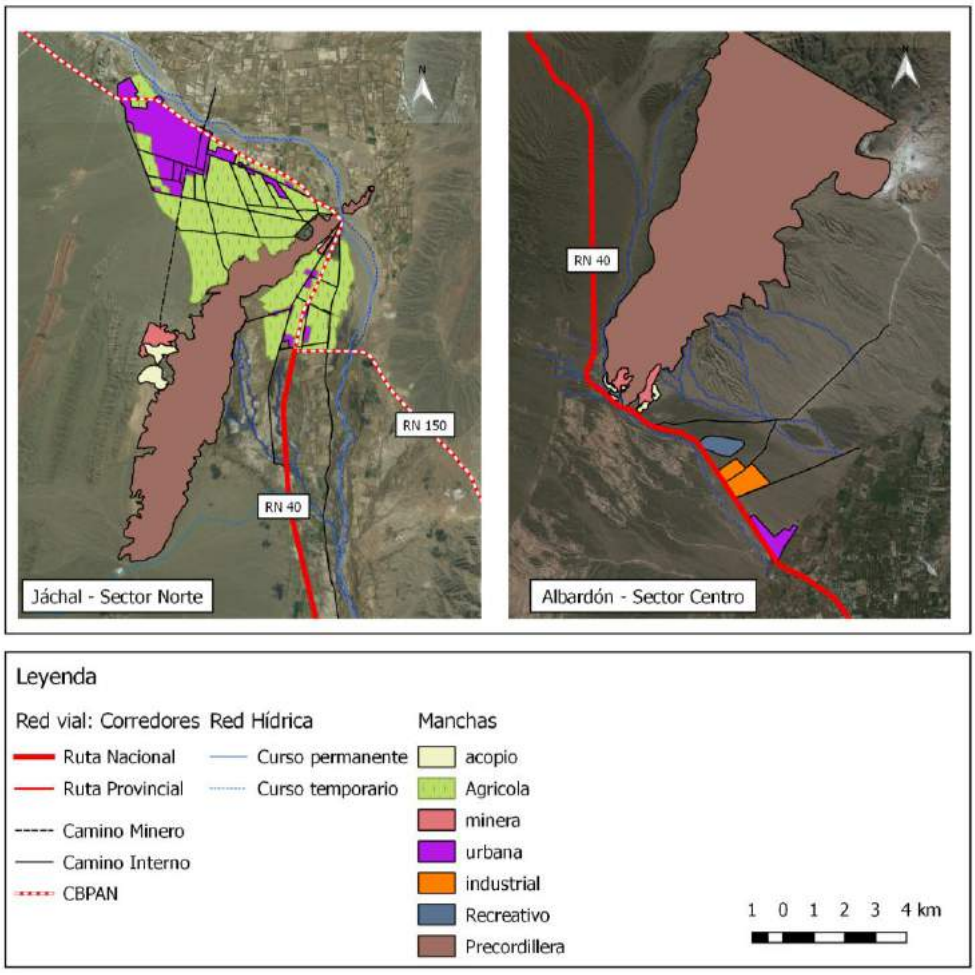


Figura 4. Configuraciones Espaciales. **a.** Sierra de Villicum. **b.** Cerro San Roque. Fuente: Elaboración propia.

- Década de los 90 al 2004: A partir de la década de 1990 la provincia fue beneficiada con el régimen de franquicias tributarias a través de la Ley 22.973 que tenía como objetivo incentivar la radicación de inversiones a través de mecanismos como los diferimientos impositivos, instrumento económico que implicaba la exención impositiva a grandes capitales. Así, se promocionó el emplazamiento de establecimientos agrícolas altamente competitivos, cambiando la fisonomía de la explotación agrícola e imprimiendo al territorio características distintas al sistema agrícola tradicional. Por tal razón en la periferia del núcleo urbano de Jáchal aumenta la actividad agrícola, cultivándose principalmente papa, cebolla y alfalfa. En este lapso se puede visualizar cómo las manchas aumentan progresivamente por la actividad minera, el asentamiento poblacional y el desarrollo de extensiones agrícolas. Conjuntamente continúa un progresivo aumento de corredores viales y de parcelas, mostrando la matriz evidencias de reducción progresiva.
  En el sector de Albardón la mancha corresponde sólo al área minera. Los corredores están dados por la Ruta Nacional Nº 40 y las vías de comunicación tipo huella. La matriz involucra el área de los abanicos aluviales y las bajadas pedemontanas, que se mantienen en cuasi estado natural.
- Período: posterior al 2009 y como consecuencia de la instalación de grandes proyectos metalíferos a mediados de la década del 2000, el sector calero de la provincia creció considerablemente. Otro hecho que sumo su impulso fue el aumento de la demanda por parte de la industria siderúrgica. Por tal razón se incrementa fuertemente la actividad minera extractiva de calizas y su industrialización.
  En este período tanto para Jáchal como para Albardón, la mancha minera se hace muy visible en el sector en donde se emplazan las canteras, distribuyéndose regularmente sobre los flancos de cada cerro, lo que conduce además a un incremento en los corredores. En Jáchal, la mancha correspondiente al asentamiento poblacional presenta un fuerte crecimiento debido a la construcción de nuevos planes de vivienda. No sucediendo lo mismo en el sector Central, ya que la minería se concentra solamente en la sierra de Villicum. En ambos casos la matriz presenta reducción más evidenciada en Albardón.
- Período 2018 – 2019: Ante una declinación de las operaciones mineras a gran escala en la economía provincial y la reducción de operaciones de exploración minera, se hace indispensable la continuidad de estos proyectos caleros para favorecer la economía regional. En lo referido al análisis espacial se ve reflejado un incremento de la mancha minera, especialmente en el sector de Albardón, por tener mayores niveles de conectividad con el sector chileno para la exportación de la cal.
  La matriz que involucra los espacios integrados por abanicos aluviales y las bajadas pedemontanas, se ven cada vez más reducidos producto de la extracción de la piedra caliza, acumulación de material derivado del proceso de trituración y sectores de acopio de residuos sólidos mineros, que son aquellos estériles sin valor económico depositados en escombreras, junto con materiales de descarte resultado de la industrialización de la piedra caliza.

El acceso a las áreas de explotación es diferencial, ya que, en Jáchal para arribar a la cantera, se debe partir desde la villa departamental; no sucediendo lo mismo para el caso de Albardón, ya que la cantera se encuentra sobre la Ruta Nacional Nº 40. Esta situación implica que, para el sector Norte, el área de explotación se involucre con las áreas urbanizadas y cultivadas; mientras que para el sector Centro, esté desvinculada a

estos usos del suelo. Es por ello que la actividad minera y su impacto sobre el área de oasis es muy diferente para ambos casos.

CONCLUSIONES

La provincia de San Juan cuenta con los yacimientos calcáreos más importantes del país, emplazados en todo el cordón precordillerano. Para la realización de este estudio se tomó como base la comparación entre dos áreas pilotos de los departamentos de Jáchal y Albardón.

El análisis temporal en los últimos 15 años, evidencia la diferencia en cuanto a la constitución de las explotaciones mineras, mostrando un mayor crecimiento en el área de Albardón, probablemente favorecido por la conectividad territorial y acuerdos comerciales. No sucediendo lo mismo en el sector jachallero por estar situado fuera del área de servicios troncales como es la Ciudad de San Juan, sin embargo, a pesar de ello, fue superando los problemas de logística y de costos referidos al entorno minero.

El análisis de las configuraciones espaciales muestra la relación diferencial que existe entre los polos y su entorno. La mancha minera va aumentando progresivamente, siendo mas notoria en el área de Albardón, junto con el incremento de los corredores realizados para tal fin; con una lenta reducción de la matriz.

En Jáchal, si bien la mancha minera presenta un crecimiento en el flanco occidental del cerro, la mancha poblacional manifiesta un comportamiento mayor, acompañado de los corredores de tipo urbano, atribuibles preferentemente a los programas de desarrollo productivo llevados a cabo por la provincia.

Otro aspecto que en la actualidad adquiere un significado particular corresponde a la conectividad territorial. En ese sentido ambos polos se encuentran sobre Ruta Nacional Nº 40, pero con algunas diferencias importantes. Por ejemplo, la presencia de la Ruta Nacional Nº 150 que recorre el departamento de Jáchal donde se encuentra el sector norte; o que el sector central, se encuentra más cercana al oasis principal de la provincia de San Juan. Estas diferencias de conectividad podrían influir en el análisis de los procesos de producción, extracción y comercialización de los productos derivados.

REFERENCIAS

Aguilo, M., (1981): Metodología para la evaluación de la fragilidad visual del paisaje. Tesis Doctoral. E. T. S. de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica, Madrid.

Aguilo A., et al., (1995): Guía para la elaboración de estudios del Medio Físico. Contenido y Metodología. Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General de Medio Ambiente.

Armenteras Dolors, Vargas Orlando (2015): Patrones del paisaje y escenarios de restauración: Acercando escalas. Acta Biológica Colombiana. Universidad Nacional de Colombia.

Ayala Carcedo, F. et al. (1989): Manual de restauración y correcciones de impactos ambientales mineros. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Bordonaro, O.L. 1990. El sistema Cámbrico de la Provincia de San Juan. In Congreso Geológico Argentino No. 11, Relatorio: 18-30. San Juan.

Canter, L (1998): Manual de evaluación de impacto ambiental. Editorial Mc. Graw Hill. España.

Gómez Orea, D. (2003): Evaluación del impacto ambiental. Coedición de Editorial Agrícola Española y Editorial Mundi-Prensa. España.

López Meza, Isabel; BisbalGrandal, Ignacio; Aroztegui, Carmen (2015): Refotografiando paisajes mineros para analizar el cambio: El caso del poblado minero de Lota en el sur de Chile. Arquitetura revista, vol. 11, núm. 1, enero-junio, 2015, pp. 11-21 Universida dedo Vale do Rio dos Sinos São Leopoldo, Brasil.

Mazzoni, Elizabeth (2014). Unidades de paisaje como base para la organización y gestión territorial. Estudios Territoriales, Revista de Geografía. N° 16, vol. 2, jul-dic 2014, pág. 51-81.

Ministerio de Energía y Minería (2018). Impacto económico de la actividad minera. Informe especial Provincia de San Juan. Disponible en: https://camaraminerasj.com.ar/wp-content/uploads/2019/10/impacto-economico-en-la-actividad-minera-de-san-juan_3053.pdf

Negrelli, Mirta M. (2013): Efecto de la actividad calera sobre los componentes ambientales del distrito minero Los Berros, Departamento Sarmiento, San Juan. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNSJ.

Negrelli, Mirta M.; Soria, María V.; Ramírez, Mónica S. (2017). Evaluación del paisaje por el impacto de la actividad calera. Revista Tiempo y Espacio. Volumen 39/2017. Editorial Universidad del Bío-Bío, páginas 4-25, ISSN 0716-9671, ISSN 0719-0867 (en línea)

Perucca Laura y Vargas Nicolás (2014): Neotectónica de la provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 66, núm. 2, 2014, p. 291-304.

Ramírez, Mónica; Salinas, Leonor y Negrelli, Mirta (2011): Determinación de la capacidad de acogida del distrito minero Los Berros, San Juan, Argentina. Revista Tiempo y Espacio. Año 22 - Volumen 27/2011, N°27. Editorial Universidad del BíoBío, páginas 31-48, ISSN en papel 0716-9671, ISSN en línea 0719-0867.

Ramírez, Mónica (2012): Evaluación y corrección de impactos ambientales. Maestría en Gestión de Recursos Minerales, Facultad de Ingeniería. UNSJ.

Subsecretaría de Planificación Territorial (2018). Planes Estratégicos Departamentales, San Juan 2030, apartado Jáchal —JAC DG Ver001.

Uliarte, E. (1977). Estudio Geológico- estructural de la Sierra de Villicum Sur, departamentos de Albardón-Ullum-Angaco, Provincia de San Juan. Tesis de Licenciatura. FCEFN, Universidad Nacional de San Juan. Inédito

Zambrano M., González V. (2002): La Valoración en el Ordenamiento Territorial.

DISEÑO DE MICROTÚNEL DE VIENTO PARA ENSAYOS DE MODELOS DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA NACIONALES

Nicoletti P.[a,b], Villanueva A. F.[a,b], Ganiele M. J.[b], Montenegro S. O.[b], Lingeri S. D.[c], Anello D. C.[d], Quinteros L.[a] y Ponzoni L. M. E.[a,b]

[a]*Universidad Nacional de Tres de Febrero, Mosconi 2736, Saenz Peña 1674, Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Laboratorio Perfil Alar, Gerencia Materiales, GAEN, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, San Martín, B1650KNA, Buenos Aires, ARGENTINA*
[c]*Laboratorio de Análisis de Vibraciones y Extensometría, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, San Martín, B1650KNA, Buenos Aires, ARGENTINA*
[d]*Laboratorio de Daño por Radiación, GAEN, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, San Martín, B1650KNA, Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: lponzoni@untref.edu.ar/ paunicoletti@gmail.com

RESUMEN

Los aerogeneradores son dispositivos complejos que dependen de la intensidad e intermitencia del viento para su funcionamiento. Por lo tanto, resulta importante la verificación de la eficiencia de los mismos antes de su construcción para que se aproveche al máximo la velocidad del viento de la zona en que se instala y maximizar, dentro de lo posible, la eficiencia del dispositivo. Es por ello que en el presente trabajo se plantea el diseño de un túnel de viento de baja velocidad especialmente para la prueba de modelos de aerogeneradores a escala en el laboratorio Perfil Alar de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Para ello, se modeló un túnel de viento de circuito abierto, de sección circular y sección de prueba cerrada en el programa SolidWorks®. Luego se simuló su funcionamiento mediante la herramienta FlowSimulation, un programa de elementos finitos, que permite obtener una vista preliminar de cómo se comportará el flujo una vez que sea construido. Para el análisis de la performance del túnel en general, se analizaron las líneas de corriente a lo largo de toda la sección del mismo, buscando que sean lo más ordenadas posibles, de forma que permita observar cómo influye el objeto de estudio en el flujo. A su vez, se estudiaron distintos parámetros dentro de la sección de prueba como la velocidad, la distribución de presiones y el número de Mach.

Palabras Clave: Túnel de Viento, Aerogenerador, Energía Eólica, Simulación, CFD.

INTRODUCCIÓN

El viento representa una fuente de energía limpia, gratuita e inagotable. Es por eso que la energía eólica comenzó a ganar terreno en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, los aerogeneradores son dispositivos complejos que dependen de la intensidad e intermitencia del viento para su funcionamiento. Es por ello que resulta importante la verificación de la eficiencia de los mismos antes de su construcción para que se aproveche al máximo la velocidad del viento de la zona en que se instala y maximizar, dentro de lo posible, la eficiencia del dispositivo. Para ello se plantea la construcción de un túnel de viento especialmente para la prueba de aerogeneradores en el laboratorio

Perfil Alar de la Comisión Nacional de Energía Atómica, tema que se abordará en el presente trabajo.
En este caso, se desarrolló un túnel de viento exclusivamente para el ensayo de aerogeneradores de eje horizontal y vertical de baja potencia, diseñados dentro del marco del proyecto Aerogenerador Social que lleva adelante la Universidad Nacional de Tres de Febrero "UNTREF" y la Comisión Nacional de Energía Atómica "CNEA".

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este caso, se ha optado por un túnel de viento de tipo abierto, ya que requiere de menor estructura y, por lo tanto, menores costos de construcción. Además, este diseño permite el intercambio directo con la atmósfera en caso de utilizar gases para la visualización de las líneas de corriente del flujo. Este tipo de túneles apela al efecto Venturi para conseguir mayores velocidades de flujo en la sección de prueba disminuyendo el área en dicha zona. (Coza, 2016)
En líneas generales, se optó por una sección de túnel circular para obtener un flujo más uniforme y laminado para evitar la concentración de fluido y formación de pequeños vórtices característicos de geometrías con ángulos rectos.
La sección de prueba se modeló cerrada, ya que se encuentra entre el ingreso de aire y la salida, para evitar fluctuaciones en el flujo. Además de un material transparente que permita observar directamente los fenómenos que ocurren dentro de ella. A continuación se puede ver una imagen de la sección de prueba del túnel de viento, fabricado con una sección de acrílico transparente que contiene en su interior un modelo de aerogenerador de eje vertical.



Figura 1. Sección de Prueba del Túnel de Viento en construcción ubicado en el laboratorio Perfil Alar. En su interior se encuentra un aerogenerador Savonius en escala impreso en 3D. Fuente: elaboración propia.

El diseño del túnel se realizó a partir de la bibliografía consultada, teniendo presente nuestras limitantes en cuanto a las dimensiones del laboratorio de Perfil Alar de la CNEA, la posibilidad de obtención de los materiales necesarios y de la factibilidad de su construcción.
Se partió de los siguientes parámetros de diseño:

- Sección de prueba de 348 mm de diámetro. (Ver Figura ***1***)
- Sección de entrada de 580 mm de diámetro.
- Motor de 1 hp y 700 RPM marca Gec Machenes L.T.D acoplado en forma directa al ventilador AX630 – 9EK de la marca Blower Chicago Argentina. Como su denominación lo indica se trata de un ventilador axial de 630 mm de diámetro, con 9 álabes dispuestos con un ángulo de ataque de 27°. (Ver Figura ***2***)



Figura 2. Modelo de Ventilador a utilizar en el túnel de viento. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para evaluar su comportamiento, se modeló el túnel en el programa SolidWorks®, como puede observarse en la Figura 3. Luego, se simuló su funcionamiento mediante la herramienta FlowSimulation, un programa de elementos finitos, el cual sirvió para tener una vista preliminar de cómo se comportará el flujo una vez que sea construido.

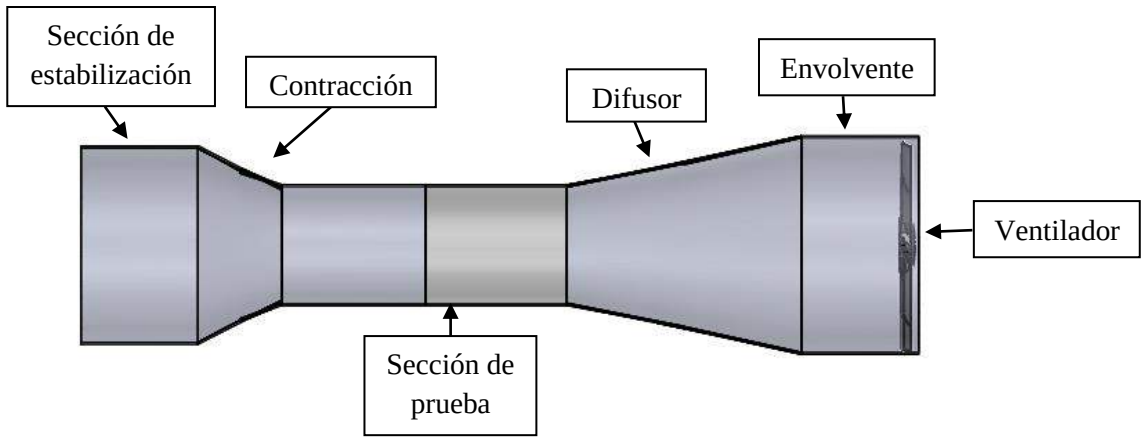


Figura 3. Túnel de viento ensamblado. Fuente: elaboración propia.

Se realizó una simulación de flujo externo con una región local de rotación, que representa el movimiento realizado por los álabes del ventilador, con una velocidad de rotación de 700[1] rpm y sujeto a condiciones estándar de presión y temperatura.
Para el análisis de la performance del túnel en general, se analizaron las líneas de corriente a lo largo de toda la sección del mismo. Estas deben ser lo más ordenadas posibles, de forma que permita observar cómo influye el objeto de estudio en el flujo.
A su vez, se estudiaron distintos parámetros dentro de la sección de prueba sobre los planos mostrados en la Figura 4. Los parámetros más relevantes a analizar fueron la velocidad, la distribución de presiones y el número de Mach. La elección de esta sección para el análisis se debe a que es donde se llevan a cabo los ensayos, es decir, donde se coloca el modelo a estudiar. Por tanto, es importante que las condiciones allí sean las adecuadas para el estudio que se pretenda realizar.

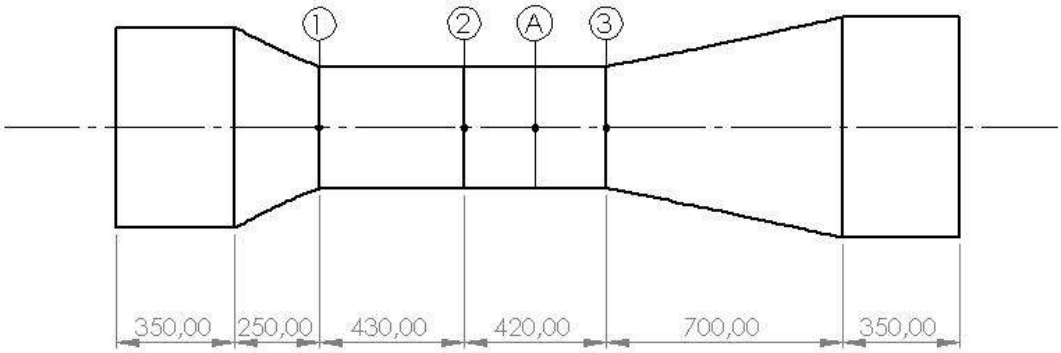


Figura 4. Plano del túnel de viento con referencias. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Configuración del ventilador

En el siguiente punto se evaluaron las distintas posibilidades de uso del ventilador. Por un lado, se colocó como impulsor, es decir, soplando aire hacia el interior del túnel, y por otro lado, el ventilador se dispuso como extractor, es decir, aspirando aire desde el interior del túnel.
En la Figura 5.a. se observa como la descarga del ventilador axial le proporciona al flujo de aire un movimiento helicoidal. Por lo tanto, en el caso de utilizar al ventilador como impulsor, obtenemos un flujo desordenado.
En la Figura 5.b., se colocó un dispositivo enderezador de flujo de estructura tipo panal de abejas, seguido del ventilador impulsor con el fin de lograr un flujo más ordenado. En esta configuración, se observa una disminución en la presión a lo largo del túnel a raíz de la pérdida de carga generada por el accesorio agregado. A su vez, en la Tabla I, vemos que la velocidad en la sección de prueba disminuye.
En cambio, al usar la configuración del ventilador como extractor, como se ve en la Figura 5.c., el flujo ingresa al túnel con menor cantidad de remolinos, las líneas de

[1] Se seleccionó esta velocidad, debido a que el ventilador tiene acoplado un motor eléctrico monofásico de 1Hp de 700 rpm en forma directa.

corriente son más ordenadas. A su vez, la velocidad alcanzada en la sección de prueba es mayor que en los otros casos, por lo que se decidió avanzar sobre esta configuración.

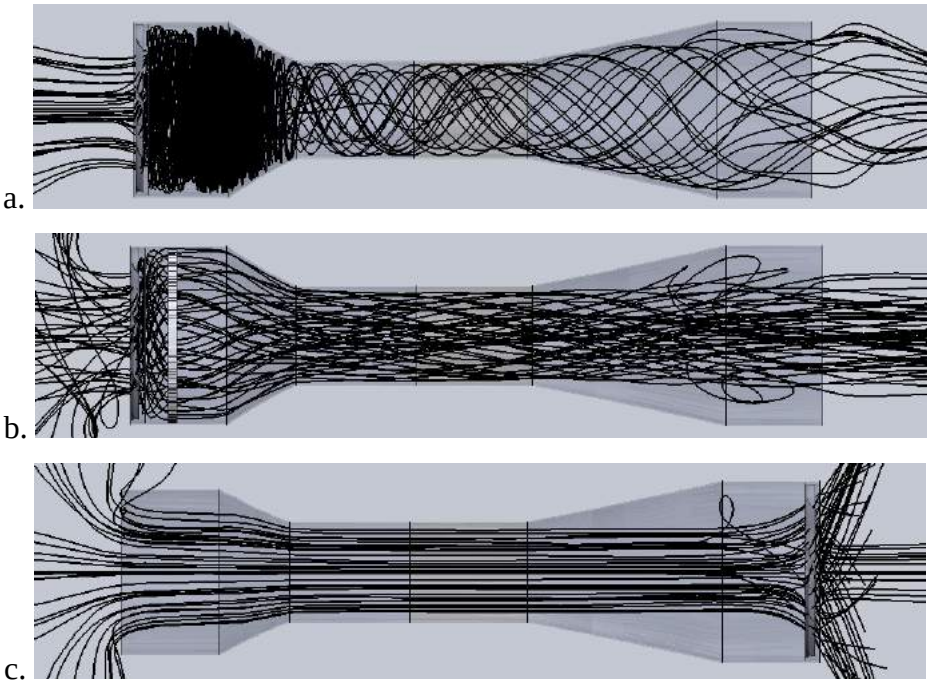


Figura 5. Líneas de flujo de aire dentro del túnel para distintas configuraciones del ventilador. Fuente: elaboración propia.

Tabla I. *Resultados en la sección de prueba según la configuración del ventilador.*

Parámetro	Unidad	Configuración del ventilador		
		Impulsor	Impulsor con enderezador de flujo	Extractor
Velocidad	[m/s]	6.532	4.669	7.106
Velocidad (x)	[m/s]	0.066	-0.030	0.007
Velocidad (y)	[m/s]	0.015	0.002	-6.590e-04
Velocidad (z)	[m/s]	6.532	4.479	7.106

Fuente: elaboración propia.

Sección de estabilización

El principal objetivo de esta sección es la de acondicionar o enderezar el flujo para que éste sea lo más laminar posible. Para cumplir dicho objetivo, se suelen colocar distintos tipo de pantallas de turbulencia que anulen las componentes de velocidad transversal del flujo; aunque estos suponen un obstáculo que disminuye la energía de la componente longitudinal del flujo representado en la corriente del fluido como una pérdida de carga. Esta condición lleva a elegir un diámetro mayor para esta sección que el diámetro de la zona de prueba para disminuir la perdida de carga, ya que la ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas depende del cuadrado de la velocidad. En este caso, teniendo en cuenta el Principio de continuidad, al aumentar la sección vamos a obtener una velocidad menor para el mismo caudal.

Por otro lado, la configuración del ventilador extractor nos proporciona un flujo considerablemente ordenado, sin embargo, para mejorar la calidad de los ensayos se propone la implementación de una malla cuadriculada de 50x50 mm al momento de la construcción. Esta permite restringir el ingreso de cualquier material ajeno que dificulte los ensayos y pueda dañar al ventilador, al mismo tiempo que permite corregir los componentes transversales de la velocidad del fluido.

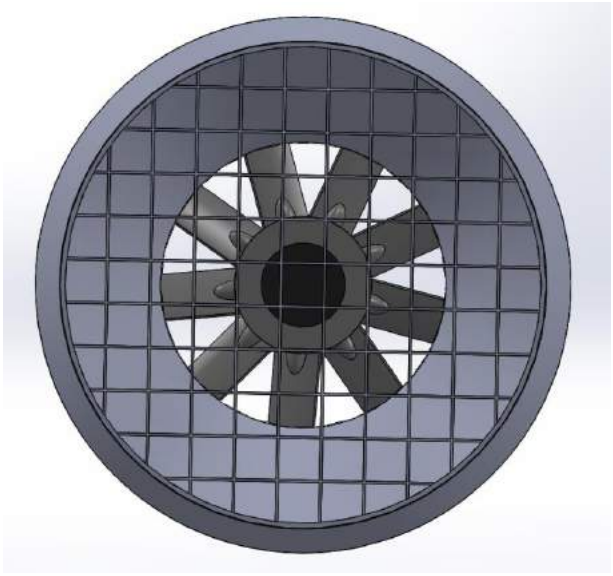
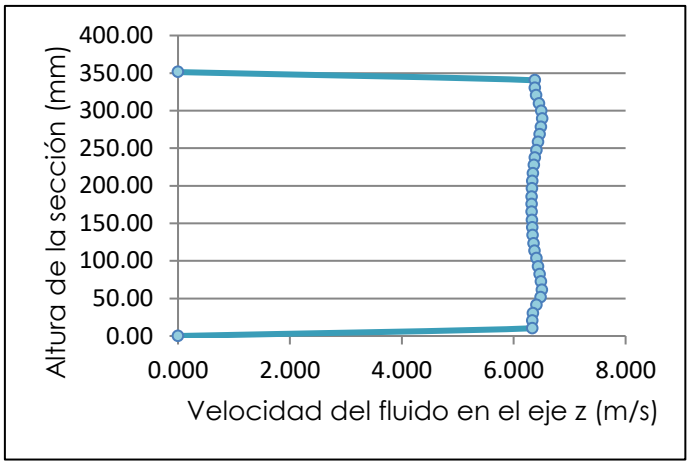


Figura 6. Entrada del túnel con pantalla de turbulencia cuadriculada. Fuente: elaboración propia.

Contracción

El objetivo de esta sección es aumentar la velocidad en la sección de prueba apelando a una disminución considerable en el área de paso del flujo.
Las paredes de la contracción guían al flujo hasta la sección de menor tamaño, mientras que en la línea central la velocidad decae. De esta forma, a la salida de la contracción se exhibe un perfil de velocidad como el de la Figura 7.b, en el que los extremos poseen una velocidad mayor que el centro del flujo. Este perfil de velocidad fue tomado a 5 mm de la entrada de la sección de prueba, donde en diámetro interno de la contracción es de 351,34 mm, y en general se observa como en la Figura 7.a.
Por lo tanto, a la salida de la contracción se coloca una longitud de asentamiento que actúe como estabilizador del perfil de velocidad del flujo. Esta longitud posee el mismo diámetro que la zona de prueba.

a.



b.

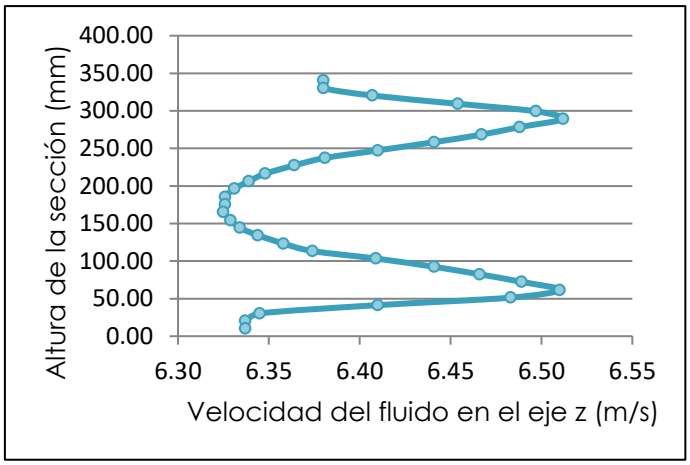


Figura 7. a. Perfil de velocidad a la salida de la contracción. b. Detalle del perfil de velocidad en el centro del fluido. Fuente: elaboración propia.

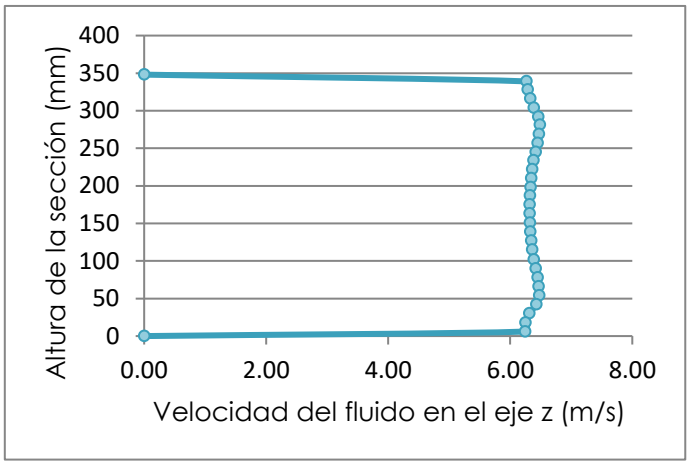
Sección de prueba

Esta es la sección más importante del túnel, ya que es el lugar en el que se instala el modelo a analizar. El flujo debe ser uniforme y la capa límite debe ser delgada para maximizar el área de la sección transversal utilizable.
A continuación se puede ver el perfil de velocidades en los planos 1, 2 y 3 de la sección de prueba marcados anteriormente en la Figura 4. Para realizar los gráficos se obtuvieron valores puntuales a lo largo de una línea vertical en el centro de la sección de prueba.

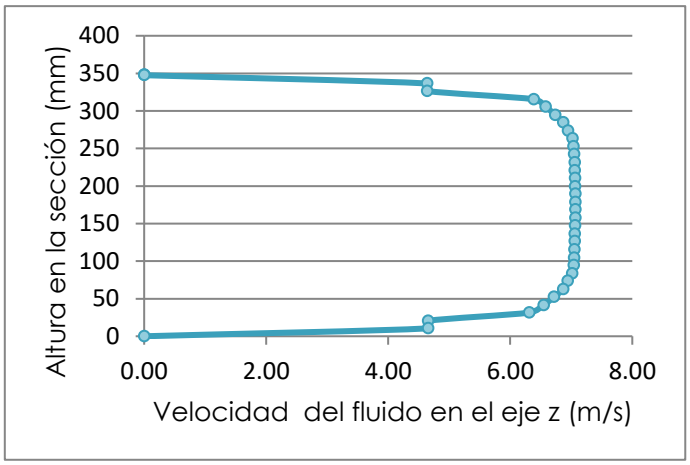
En los perfiles de velocidad graficados podemos observar como el flujo se estabiliza a lo largo de la sección de prueba. En la Figura 8.a. el perfil de velocidad se encuentra perturbado por los efectos de la contracción, ingresando a la sección de prueba con una velocidad uniforme. A medida que el gas fluye por la sección circular la condición de no-deslizamiento en los límites sólido-líquido provoca que las capas adyacentes desaceleren su velocidad debido a la viscosidad del fluido. Esa reducción de la velocidad produce un consecuente aumento de la velocidad del fluido en la sección

media de la tubería para mantener constante la razón de flujo de masa a través de la tubería. Por lo tanto, podemos ver que en el flujo comienza a establecerse un gradiente de velocidad como el de la Figura *8*.b. Finalmente, en la Figura *8*.c. vemos que el perfil sigue desarrollándose.

a.



b.



c.

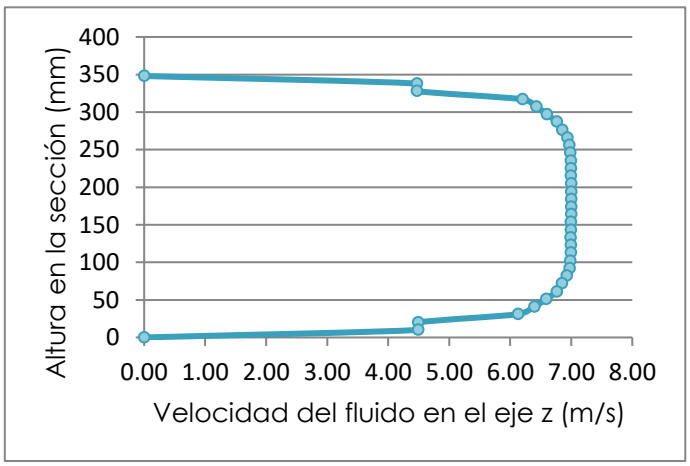


Figura 8. a. Perfil de velocidad en plano 1. **b.** Perfil de velocidad en plano 2. **c.** Perfil de velocidad en plano 3. Fuente: elaboración propia.

En la transición entre la Figura *8*.b. y la Figura *8*.c. y se observa una leve variación del perfil de velocidad, por lo que el centro de esta sección será donde se implantarán los modelos a analizar. Específicamente en el plano A, el cual se representa en la Figura 4. Por lo tanto se analizan la variación de la presión y de la velocidad en dicho plano transversal A, al igual que se analizan otros parámetros importantes presentes en la Tabla II.

Tabla II. *Valores de los parámetros en el punto A de la sección de prueba Figura 4.*

Parámetro	Unidad	Valor
Presión estática	[Pa]	101294.43
Presión dinámica	[Pa]	30.39
Presión total	[Pa]	101324.82
Velocidad	[m/s]	7.106
Velocidad (x)	[m/s]	0.007
Velocidad (y)	[m/s]	-6.590e-04
Velocidad (z)	[m/s]	7.106
Número de Mach	[adimensional]	0.02
Densidad	[kg/m^3]	1.20
Viscosidad dinámica	[Pa.s]	1.8145e-05

Fuente: elaboración propia.

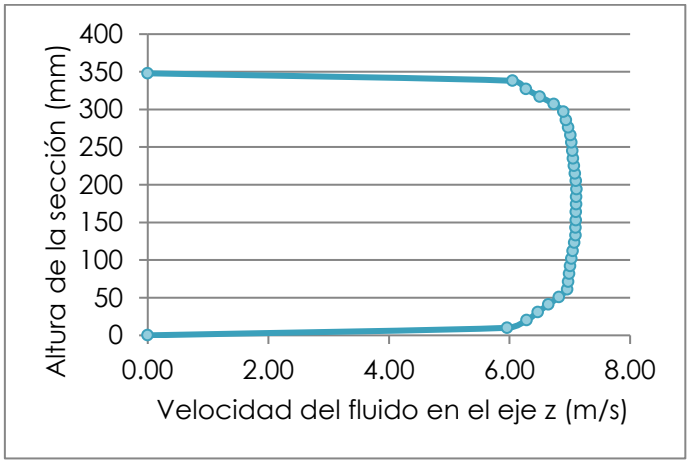


Figura 9. Perfil de velocidad en el plano A. Fuente: elaboración propia.

a. b.

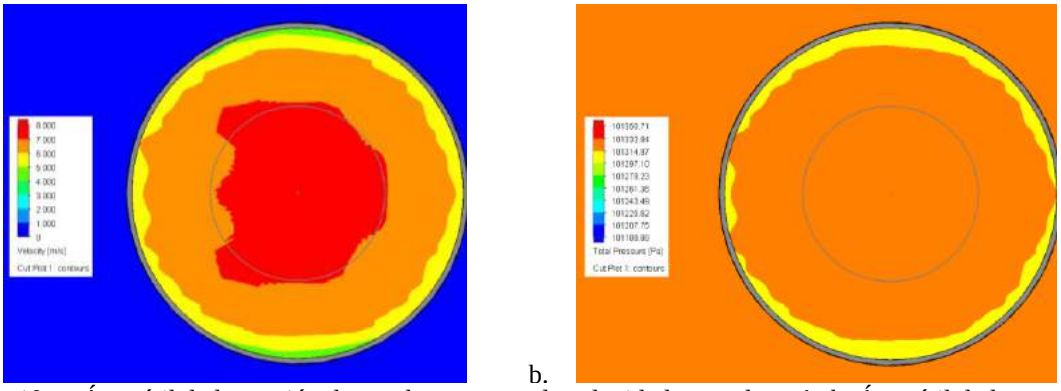


Figura 10. a. Área útil de la sección de prueba y campo de velocidades en plano A. b. Área útil de la sección de prueba y campo de presiones en plano A. Fuente: elaboración propia.

La presencia de la capa límite en el flujo nos lleva a distinguir dos regiones en la sección del túnel. Por un lado, la capa límite en la que la velocidad es inestable debido a la viscosidad y a la condición de no-deslizamiento. Por otro lado, la región de flujo central en la que la velocidad es más uniforme ya que los efectos de fricción son despreciables. (Mataix, 1986)
Al analizar el perfil de velocidad de la Figura 9 podemos determinar el área útil de la sección de prueba del túnel de viento. De forma estricta, muestra una velocidad uniforme a lo largo de la sección de prueba, con una capa límite de aproximadamente 84 mm en cada pared del túnel. Por lo tanto, para evitar que la capa límite cerca de las paredes interfiera en las pruebas de los modelos, se tomará como sección útil del mismo 180 mm de diámetro desde el centro. Como podemos ver en la Figura 10.a. y en la *Figura* 10.b., en las cuales se muestra la dimensión de la sección útil.
En la Figura 10.a. vemos que la velocidad en la sección útil determinada es constante, aunque exhibe leves deformaciones.

Difusor

La función principal de esta sección es disminuir la velocidad de salida del flujo, gracias a un incremento del área de paso del fluido. Por consiguiente, se aumenta paulatinamente la presión y se disminuye la velocidad del flujo. Sin embargo, cuanto mayor es el ángulo del difusor, mayor la pérdida por la turbulencia generada entre la línea de flujo y las paredes del mismo. (J.B. Barrow., 1999)

Envolvente del ventilador

Un detalle a destacar, es la configuración de la sección que recubre el ventilador. En las simulaciones se pudo observar que al existir un espacio libre entre los álabes y las paredes de la sección se generaban cortocircuitos o flujos de recirculación acompañado de remolinos en la sección.
La aparición de estos remolinos se dio con un espacio de 20 mm entre el extremo de los álabes del ventilador y la pared del túnel Figura 11.a. En cambio, se redujeron al disminuir este espacio. En la Figura ***11***.b., se ve que con una diferencia de 5 mm entre álabes y envolvente, prácticamente no aparecen estos remolinos.

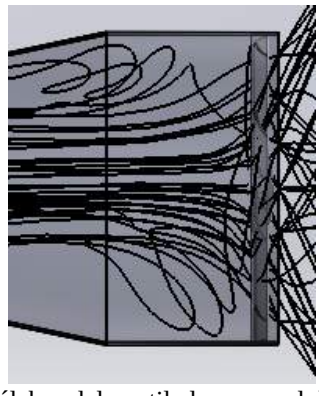
a.  b. 

Figura 11. a. Líneas de corriente con separación de 20 mm entre álabes del ventilador y pared del envolvente. b. Líneas de corriente con una separación de 5 mm entre álabes del ventilador y pared del envolvente. Fuente: elaboración propia.

Visión general

Finalmente, a modo de resumen se muestran los resultados de la simulación sobre un plano longitudinal del túnel de viento, en el cual se representa la variación de la presión a lo largo de este, la velocidad, el número de mach y la densidad.

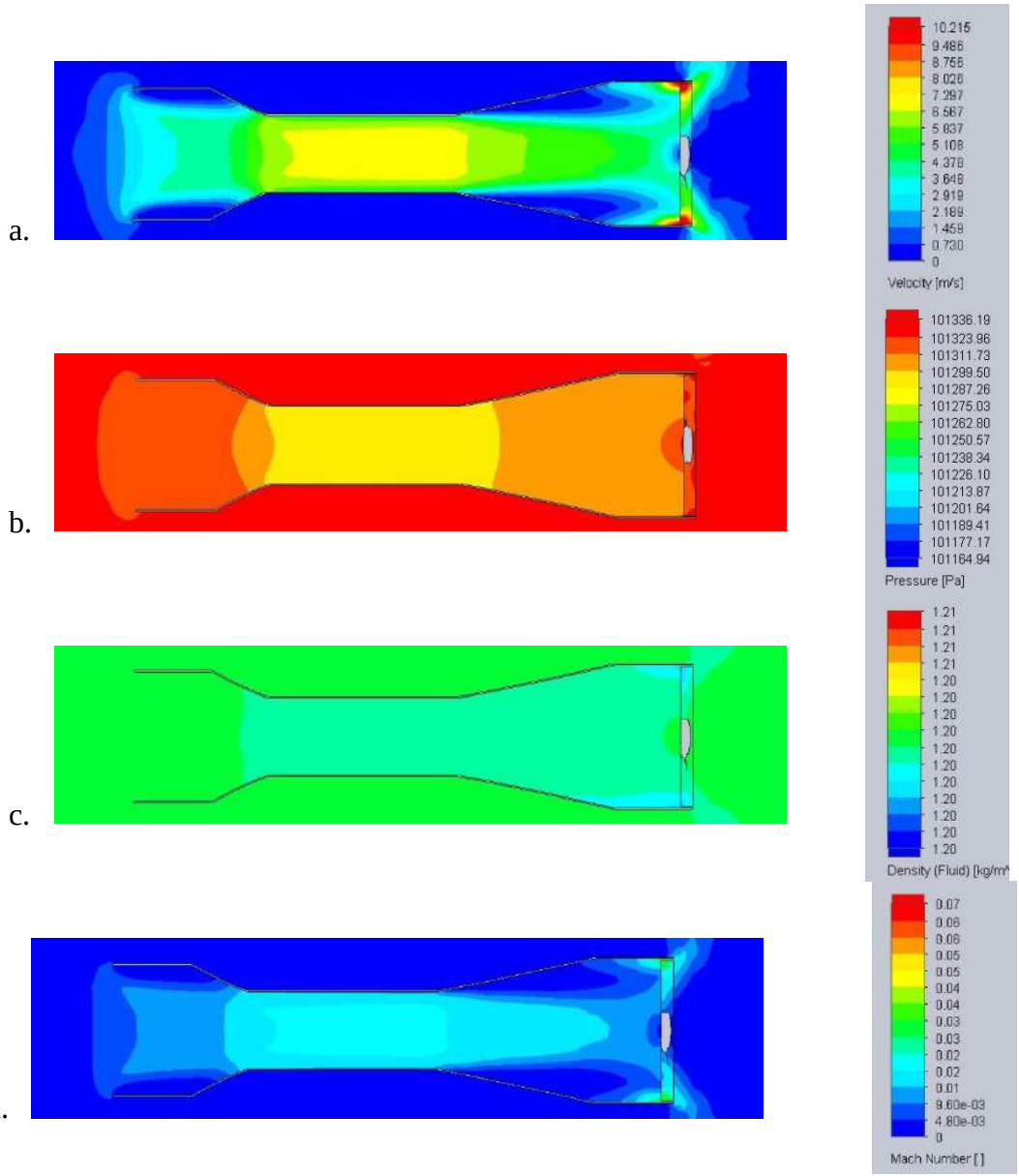


Figura 12. a. Variación de la Velocidad. b. Variación de la presión total. c. Variación de la densidad. d. Variación del número de Mach. Fuente: elaboración propia.

La Figura 12.a. nos permite observar la velocidad que se obtuvo en cada una de las secciones del túnel, como disminuye en aquellas secciones de mayor área y, al contrario, aumenta en la sección de prueba, similar a lo evaluado por (Ismail et al, 2020).

En la Figura ***12***.b. observamos como varía la presión dentro del túnel, manteniendo una relación inversa con la velocidad. Sin embargo, esta variación de presión es casi despreciable, provocando un efecto insignificante en la densidad del aire, como

podemos ver en la Figura ***12***.c. Por lo tanto, la suposición de un fluido incompresible, según el número de Mach, cuya variación se muestra en la Figura ***12***.c., es completamente válida. (NASA, 2015)

CONCLUSIONES

En este trabajo se logró caracterizar y avanzar en el funcionamiento de un túnel de viento de baja velocidad, a partir de un programa de simulación de fluidos (CFD) para la prueba de aerogeneradores de baja potencia a ser instalado en el Laboratorio de Perfil Alar.

Se obtuvo información importante para su construcción, como la existencia de una longitud de estabilización del flujo entre la contracción y la sección de prueba. Además de la configuración del ventilador y la importancia de la geometría de su envolvente.

Se comprobó un valor de número de Mach de 0.02, casi constante a lo largo del túnel. Esto nos indica que se tiene un régimen subsónico (Ma<0,8), de forma que el flujo puede considerarse incompresible, es decir, que la densidad será constante a lo largo de la sección del túnel. De esa forma, se podrán simplificar los cálculos durante los ensayos.

Se determinaron los parámetros básicos de la sección de prueba como son la velocidad de 7.106 m/s, la presión 101294.43 Pa y la viscosidad dinámica 1.8145e-05 Pa.s. Al igual que se logró determinar la sección útil de la misma, con un diámetro aproximado de 180 mm desde el centro.

A partir de aquí en adelante será necesario realizar trabajos futuros que impliquen el acondicionamiento de la sección de prueba del mismo con los elementos necesarios para la medición de las variables requeridas en el estudio de microaerogeneradores. Una vez acondicionada la sección de pruebas, podremos realizar las pruebas de eficiencia de distintos aerogeneradores, determinar cuál responde mejor a los vientos del sitio de emplazamiento y caracterizar su funcionamiento de acuerdo a la variación de vientos. Este será un paso importante dentro del proyecto Aerogenerador Social, que permitirá seguir creciendo dentro del campo de la energía eólica.

REFERENCIAS

Coza, D. E. (2016). Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos en régimen subsónico y transónico. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Ismail, Johanis John, Erlanda A. Pane, Budhi M. Suyitno, Gama H.N.N. Rahayu, Damora Rhakasywin (2020).*Computational fluid dynamics simulation of the turbulence models in the tested section on wind tunnel*. Ain Shams Engineering Journal.

J.B. Barrow., H. R. (1999). Low-Speed Wind Tunnel Testing. Nueva York: John Wiley & Sons.

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.* Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.

NASA. (05 de 05 de 2015). NASA. Recuperado el 18 de 03 de 2020, de https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html

ANÁLISIS DE SUELOS PARA ESTUDIAR SEGURIDAD SOCIOAMBIENTAL DE ZONAS QUE ESTUVIERON INUNDADAS EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN. PROPUESTA DE ESQUEMA DE MUESTREO PARA LÍNEA BASE.

Ortiz F.[a], Barbini A.[a] , Colla J.[a] , Ceballos M.[a] , Tabarez M.[a] , Previtali E.[a], Corvalán Moya C.[a,b,c]

[a] *Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*
[b] *Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA*
[c] *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA*

e-mail: ccmoya@untref.edu.ar

RESUMEN

Las inundaciones son un tipo particular de los conocidos "desastres naturales". El abordaje de la problemática tiene múltiples aristas para establecer competencias/responsabilidades y acciones de las distintas instancias jurisdiccionales en función del reparto que la Constitución Nacional determina. Este trabajo se desarrolla en el marco de un proyecto entre la Universidad Nacional de Tres de Febrero y el Gobierno de la Provincia de Tucumán y su objetivo general es analizar las regiones inundadas en el sur de Tucumán (entre los años 1992-2019), cuenca baja del Río Marapa, comprendida entre las localidades de Graneros y Lamadrid, evaluándose el posible aporte de metales pesados. En el presente trabajo se muestran los resultados de objetivos particulares del proyecto marco. Esta primera instancia consistió en la determinación del esquema de muestreo para la línea base ambiental de suelos, la cual funcionará como referencia para todo el análisis posterior. Dicho esquema fue determinado mediante el análisis de imágenes satelitales utilizando distintas herramientas de sistemas de información geográficos (SIG) y teledetección. Se consideraron las siguientes variables de elección para los puntos de muestreo: zonas anegadas, curvas de nivel, intervención antrópica y accesibilidad. Las zonas anegadas fueron determinadas mediante el análisis de índices normalizados de diferencias de agua y una propuesta de clasificación supervisada, las curvas de nivel mediante herramientas de Google Earth y la intervención antrópica fue establecida principalmente en función del grado de deforestación de la región de estudio utilizando bases de datos existentes sobre la temática. Se discuten limitaciones y fortalezas de las variables mencionadas y finalmente se presenta una propuesta del esquema de muestreo.

Palabras Clave: Contaminantes, Inundaciones, SIG, línea base suelos

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son “desastres naturales” que suelen tener orígenes multifactoriales. Podría definirse desde la física como un fenómeno caótico de movimiento no solo de agua propiamente dicho sino también que, además, sucede el desplazamiento, tanto por un movimiento de tipo advectivo como difusivo, de diferentes elementos y compuestos que podrían convertirse en contaminantes ambientales para la región. Los mismos podrían asimismo persistir en el tiempo y alterar características físico- química del suelo, mas allá de estar al presente bajo control la situación de inundación propiamente dicha. En particular las inundaciones en el sur de la provincia de Tucumán adquirieron cierta

periodicidad, manifestándose en las últimas décadas con una frecuencia progresiva. En función de actividades industriales de la zona, se propone la evaluación en suelos de posibles metales pesados que podrían haber sido trasladados con el movimiento del agua. En este sentido, en una primera etapa definir el patrón de comparación estableciendo la línea base se vuelve de suma importancia, dado que un patrón de comparación erróneo podría conducir a una sobreestimación o subestimación de los valores de concentraciones de los elementos de análisis.
El estudio de la calidad de suelo estará compuesto por varias etapas de investigación. Según lo establecido por la norma IRAM 29481-5; en una primera etapa resulta fundamental recabar toda la información posible sobre el área de estudio que permita conocer las características del suelo y la hidrología local. Una vez realizada, se proseguirá con una investigación detallada en la cual se analizará el uso previo del suelo y toda actividad que haya influido en él. Posteriormente, se realizará la planeación y diseño del muestreo, y finalmente el establecimiento de una línea de base, la cual se define como el estado de la zona de estudio previo a una alteración determinada.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra situada en la cuenca baja del Río Marapa entre las localidades de Graneros y Lamadrid, departamento de Graneros, en la provincia de Tucumán, Argentina. La cuenca pertenece al sistema hídrico de la cuenca Río Salí-Dulce (Díaz Gómez, et al 2018). El estudio de este sitio se extiende en una superficie de aproximadamente 230 km^2, siendo prioritaria la zona lindante al Río Marapa “ver Fig. 1”. Con respecto a su ubicación geográfica, hacia el oeste se encuentra la Cadena del Aconquija, luego el pedemonte y la llanura aluvial deprimida, donde se localiza la zona estudiada, que se extiende en dirección este hacia el Embalse de Río Hondo.
Los suelos que predominan pertenecen a los órdenes Inceptisoles, suelos pobremente estructurados de textura limo-arenosa fina y de baja infiltración, y Molisoles, suelos desarrollado en los cuales predominan las áreas ganaderas y agrícolas con cultivos de soja, maíz, caña de azúcar y trigo, que fueron creándose por la deforestación de los bosques nativos (Informe CIST, 2017).
Los bosques secos y selvas pedemontanas nativas se estima sufrieron una pérdida de 956 km^2 entre los años 1984-2017 debido a los desmontes (Informe CIST, 2017).
Los núcleos urbanizados se localizan solo en Graneros, cuya población es de 2.375 habitantes, y en Lamadrid, la cual presenta una población de 4.580 habitantes, según el censo de 2010 (INDEC).
El Río Marapa posee un caudal promedio anual de 5,8 m^3/s, una longitud total de 150 km y una cuenca hidrográfica aproximada de 900 km^2. Su naciente se localiza en Catamarca, donde se extiende por 10 km hacia Tucumán, con el nombre de Río Singuil, hasta confluir en el Dique Escaba. Desde el Dique toma el nombre de Río Marapa y finaliza su recorrido en el Embalse de Río Hondo. Posee dos afluentes principales que aportan grandes caudales, el Río San Ignacio y el Río San Francisco. Entre Graneros y Lamadrid se localizan, además, pequeños arroyos y paleocauces, que conforman zonas anegables.
Desde el punto de vista meteorológico, la región presenta un clima monzónico con una estación lluviosa en verano y seca en invierno, cuya temperatura media anual es de 17,6 ºC (Informe CIST, 2017). Durante el verano, según los datos provistos por la Estación Famaillá del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), las intensas precipitaciones pueden alcanzar un máximo de 261 mm/día, siendo enero, febrero y marzo, los meses más lluviosos. Estas intensidades elevadas de precipitación producen

desbordes y crecidas en los ríos, que afectan a las poblaciones cercanas a las laderas de estos.

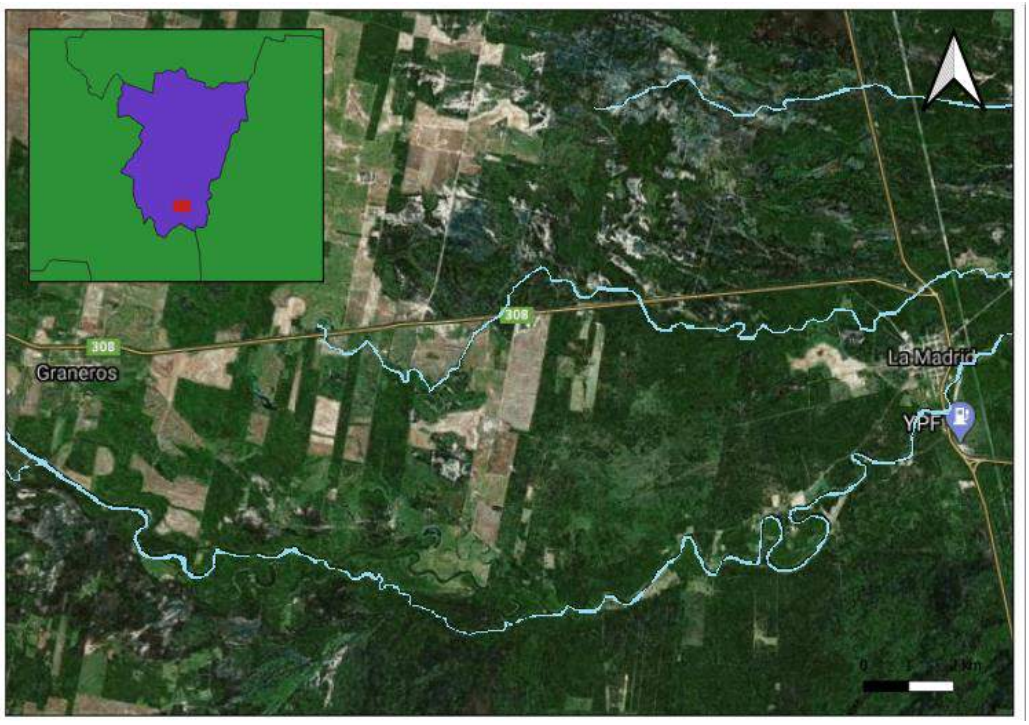


Figura 1. Imagen satelital de la zona de estudio adquirida mediante Google Earth. Se destacan hacia el oeste la localidad de Graneros y al este Lamadrid, Tucumán. Elaboración propia.

ANTECEDENTES

En base a la información detallada anteriormente, se evidencia que las causantes de las inundaciones son múltiples, sin embargo, se pueden destacar las altas intensidades de las precipitaciones durante el verano, que provocan crecidas y desbordes del Río Marapa y sus afluentes. Las precipitaciones analizadas mediante los datos proporcionados por el INTA indican que la precipitación media hasta el 2015 fue de 853 mm/año “ver Fig.2”. Este hecho se repite anualmente, en mayor o menor medida, y por lo general coincidía cuando se presentaba el fenómeno de El Niño (Díaz, A. M, 2018). Sin embargo, la acción del hombre ha agudizado esta problemática ya que la deforestación, el desvío de ríos, el encauce de otros y un nulo dragado del embalse Río Hondo han generado un escenario caótico y susceptible a inundaciones, en particular en la localidad de Lamadrid, debido a que se encuentra muy cercana a la línea de ribera del Río Marapa “ver Fig. 3”. En dicha localidad sus habitantes se autoevacúan y recurren a refugiarse al norte de la ruta nacional 157, debido a que la cota más alta de esta zona no permite que se anegue. Son ejemplo las inundaciones recientes ocurridas en los años 2017 y 2019, cuyos efectos fueron devastadores para la población y sus viviendas.

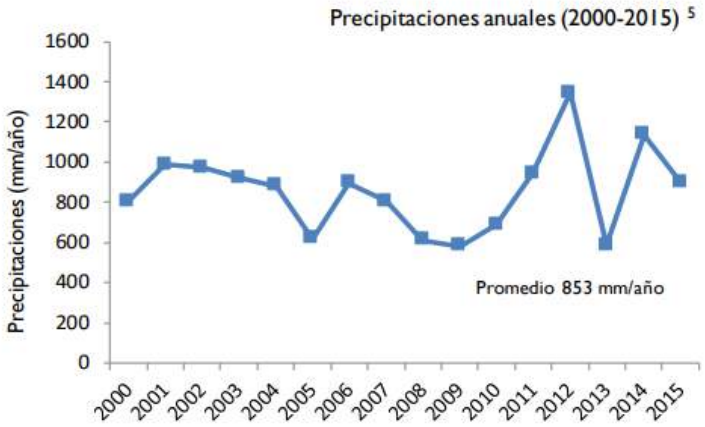


Figura 2. Precipitaciones anuales en General Lamadrid. Fuente INTA



Figura 3. Área de inundación de Lamadrid en el año 2017.Comisión de Inundaciones en el Sur de la provincia de Tucumán (2017).

El conjunto de acciones antrópicas, como la expansión de áreas agrícolas sin planificación, asociadas a eventos climáticos extremos generó el incremento tanto de superficies de aporte como de caudales de la cuenca intermedia y baja. Para dimensionar el impacto de la expansión agropecuaria se estima que la superficie para cosecha aumentó un 88 % entre 2001 y 2015. Éste incremento fue a razón de 6.000 ha/año, mientras que el 40 % de la superficie de Lamadrid corresponde al uso ganadero (Recavarren, P. 2006). Esta expansión provocó la modificación de la dinámica hidrogeomorfológica de la cuenca, el incremento de la erosión de los suelos, el transporte de sedimentos y los caudales de escorrentía. La expansión de la agricultura causó también la canalización del Río San Francisco convirtiéndolo en un afluente del Río Marapa. La alteración de su recorrido originó que el caudal de crecida, que antes escurría y se extendía en los bañados, sea encauzado y dirigido hacia el Marapa, incrementando el caudal de este último. Estos hechos tuvieron un rol gravitante en la magnitud de las inundaciones de Lamadrid.

MÉTODO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la selección de los puntos de muestreo representativos para el establecimiento de la línea base , se utilizaron diversas herramientas que incluyen revisión bibliográfica (formal e informal como ser periódicos locales) y utilización de imágenes satelitales para análisis cuasi-cualitativos (clasificación supervisada) o semi-cuantitativos (índices) o imágenes SAR (solo utilizadas para comparaciones en fechas específicas) aplicando diversas técnicas de teledetección en la plataforma *Google Earth Engine* y el software *QGIS.* Finalmente se estableció una matriz de ponderación con las variables de interés para la selección.

ANÁLISIS DE MÁGENES

Desde hace décadas se han enviado al espacio diversas misiones que incluyen sensores para observar la Tierra. Los que se utilizaron para este trabajo corresponden a las misiones *Sentinel 1 y Sentinel 2.*

Sentinel 1 es una misión del programa Copernicus desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) que consta de 2 satélites de órbita polar con tecnología de Radar de Apertura Sintética (SAR). Esta tecnología tiene la ventaja de operar con bandas de longitud de onda que no son obstruidas por las nubes y son capaces de operar en todas las condiciones climáticas. Los productos obtenidos tienen una resolución espacial de 5 a 20 m por píxel y tiene un ancho de barrido de hasta 400 km. Las aplicaciones principales de estos satélites están orientadas al manejo de desastres naturales, como inundaciones, deslizamientos de tierra, monitoreo de glaciares, etc. (ESA).

Sentinel 2 también corresponde a la serie de misiones del programa Copernicus de la ESA. Se trata de 2 satélites con un sensor multiespectral de 13 bandas de alta resolución, que van desde los 10 hasta los 60 metros de resolución por píxel. La combinación de estas bandas permite obtener índices de los que se puede recabar información acerca del estado de la vegetación, humedad y zonas anegadas. Debido a esto es utilizada para fines agrícolas, monitoreo de bosques, cambios en la superficie terrestre, entre otros (ESA, 2015).

La respuesta espectral de una parcela de terreno se debe en última instancia al tipo de cubierta que esta contenga. El objetivo de la teledetección es determinar la relación de los objetos y variables de la superficie terrestre con su respuesta espectral, y así poder determinar unas a partir de las otras. Uno de los métodos más utilizados para esto son las operaciones entre las bandas de una imagen satelital, cuyo resultado es un indicador de un aspecto específico de la superficie. El resultado de este tipo de operaciones se denomina índice.

Se eligieron dos tipos de índice para la evaluación de áreas inundadas o anegadas, y posteriormente se realizó una comparación entre ambos métodos.

- Indice NDWI (Normalized Difference Water Index)
    - McFeeters (1996) propuso el índice NDWI de la ecuación:

$$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR) \qquad (1)$$

 ISBN 978-987-1323-66-1

Con el propósito de maximizar la reflectancia del agua utilizando la banda verde, minimizar la baja reflectancia del NIR (Infrarrojo Cercano, por sus siglas en inglés) por las características del agua y tomar ventaja de la alta reflectancia del NIR, por las características de la vegetación y suelo. De esta manera el suelo y vegetación toman valores negativos y el agua valores positivos (McFeeters, 1996).

- Xu (2006) - MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)

  La propuesta de Xu, fue la utilización de un índice NDWI al que sustituyó la banda del NIR utilizada por McFeeters, por la banda MIR (Infrarrojo Medio por sus siglas en inglés). Por lo que la ecuación resulta en:

$$MNDWI = (GREEN - MIR)/(GREEN + MIR) \quad (2)$$

  El resultado fue una mejor delimitación de agua, suprimiendo el ruido de fondo que algunos suelos y vegetación ocasionaron (Xu, 2006).

- Imágenes SAR

  Las imágenes adquiridas de Radar de Apertura Sintética se obtuvieron de la misión Sentinel 1 de la ESA. Se utilizó la plataforma Google Earth Engine, en la que, mediante algoritmos, se aplicó una máscara para discriminar las zonas con presencia de agua. La polarización utilizada fue VH (vertical-horizontal), recomendada por Hussing (1995), además de Leckie y Ransson (1998), debido a que se obtenían mejores reflexiones de radar en las esquinas, especialmente para áreas con estructuras urbanas (Liao, H. Y. and Wen T. H., 2020).

- Clasificación supervisada

  Con el fin de determinar las distintas zonas de interés, este método permite, a partir del criterio de quien realice el mapa, determinar una característica particular de una cierta región del mismo. Con un conocimiento previo del lugar, mediante visualización de imágenes satelitales, se le asigna a un conjunto de pixeles o un píxel, un cierto valor (color) que funciona como patrón, a partir del cual aquellos que sean iguales a este píxel o conjunto de píxeles, se les asignará automáticamente el mismo valor. De esta forma los píxeles de terrenos de zonas que comparten una misma característica quedan delimitadas por este valor.

A partir de la información obtenida de las imágenes satelitales, se propondrá establecer la ubicación de los puntos a partir de los cuales se obtendrán las muestras. La elección se basa en la consideración de 4 aspectos: la facilidad de acceso a los mismos (trazado de caminos rurales), la altura de cota en la que se encuentran (análisis de nivel de imágenes satelitales), la lejanía a las zonas anegables o cuerpos de agua que hayan podido alterar su composición (análisis de índices de imágenes satelitales) y de la alteración antropogénica (análisis de deforestación de imágenes satelitales) que hayan sufrido. Estas variables serán evaluadas mediante el uso de una matriz de ponderación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de analizar y procesar las imágenes de las fechas de inundaciones en los años 2017 y 2019 se obtuvieron los siguientes resultados.

ÍNDICES

En los resultados con NDWI y MNDWI "ver Fig.4", a los que se les aplicó una máscara para resaltar valores superiores a 0 (zonas anegadas), se pudo observar que las principales zonas afectadas (en blanco) en las fechas de inundaciones se encuentran en la parte sur de Lamadrid, cercana al río, y donde se une el Río San Francisco con el Río Marapa, afectando un área aproximada de 3,7 km^2; esta aproximación del área afectada surge de la diferencia entre superficies indicativas del agua en la inundación (03/04/19) y el área que abarca el agua anterior a la inundación (14/03/19) Al aplicar las máscaras de valores mayores a 0 a los índices, el MNDWI presentó mayores superficies que el NDWI. Se tomaron imágenes libres de nubes para evitar interferencia de sombras que podrían detectar los índices (Bochow et al, 2012).

Los resultados de las superficies inundadas según cada autor registraron diferencias. El NDWI de McFeeters subestimó ampliamente el área con respecto al método Xu, el cual presentó mayor registro de áreas potencialmente anegadas. Esto puede deberse a que luego de la inundación gran cantidad de sedimentos fueron arrastrados por el río, y la banda del NIR utilizada en el NDWI es un buen indicador de aguas libres pero falla si el agua contiene sedimentos o vegetación emergente (Bustamente et al, 2005). Además, al no existir un perfil espectral para la clase "zona construida" (Roessner et al, 2011), muchos materiales construidos pueden arrojar falsos positivos tanto para NDWI como para MNDWI. (Bochow et al. 2012), como se detectaron en zonas urbanas de Lamadrid en máscara de McFeeters durante la inundación. En este sentido la posibilidad de realizar a futuro una comparación con otros métodos como ser la clasificación supervisada brindará mayor precisión al análisis.

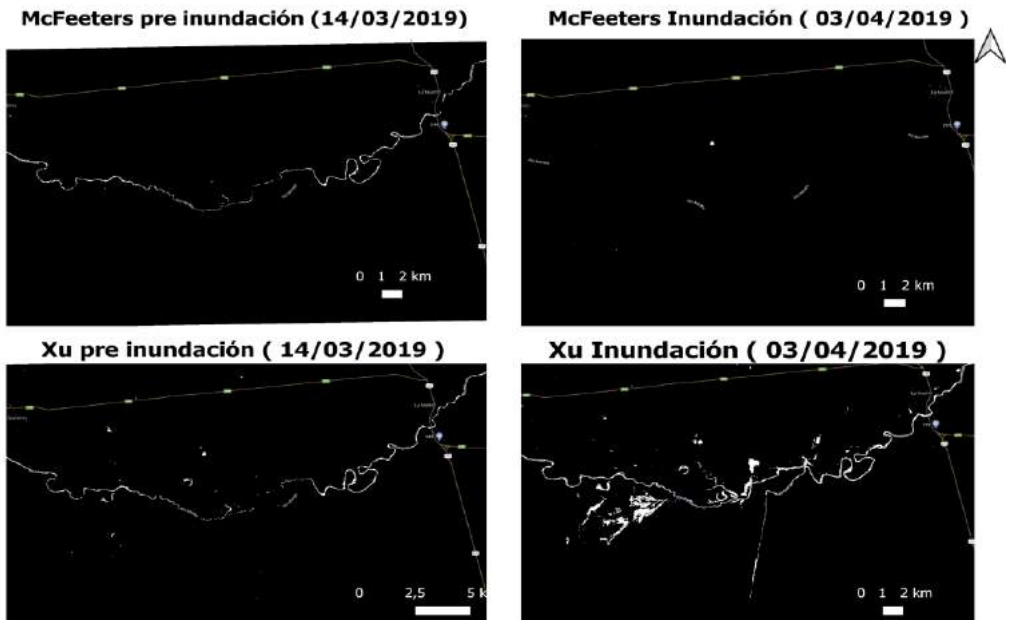


Figura 4. Imagen comparativa del Río Marapa enmascarado (blanco representa área con agua), zona entre Lamadrid y Graneros, con máscara de NDWI (McFeeters, 1996) superior a 0 en la parte superior de la imagen y MNDWI (Xu, 2006) en la parte inferior.

Por el contrario, el método MNDWI propuesto por Xu, detectó superficies más coherentes respecto a lo visualizado en la imagen satelital. Sin embargo, no detectó agua en zonas que se consideraron anegadas dentro del pueblo Lamadrid mediante la visualización en imagen satelital.
En los análisis con imágenes SAR para el año 2017, una semana después del pico de la inundación, registraron áreas potencialmente anegadas de aproximadamente 370 ha (en azul) "ver Fig.5". Para este caso fueron de gran utilidad las imágenes SAR por la imposibilidad de obtener imágenes multiespectrales libres de nubes del área durante el mes de abril.

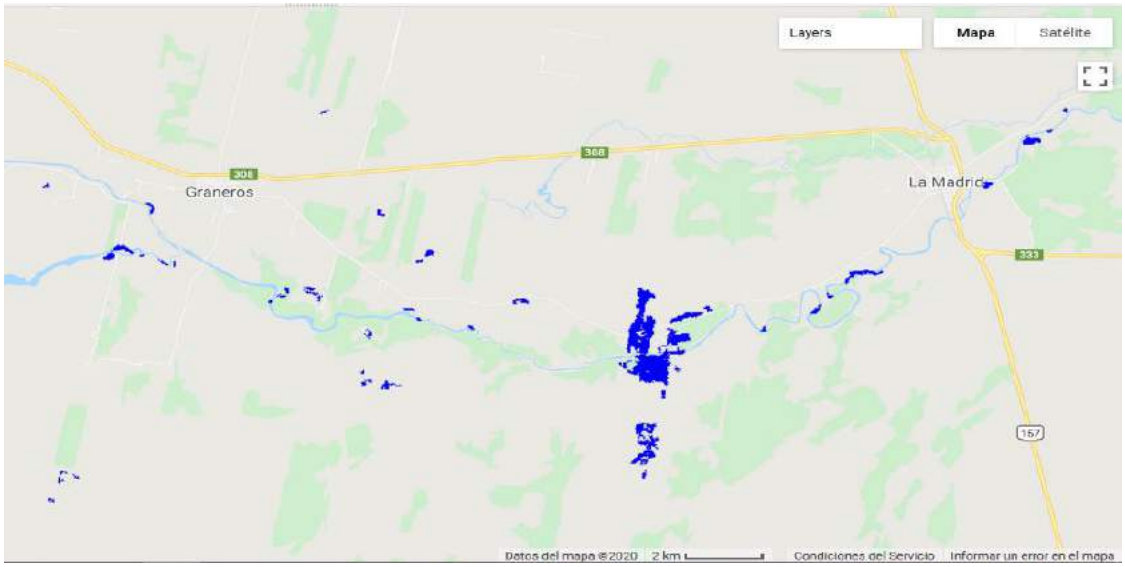


Figura 5. Localidades de Graneros y Lamadrid, con zonas inundadas en color azul, Sentinel 1 al 11/04/17. Elaboración propia.

ANÁLISIS DE NIVEL (COTA) Y ACCESIBILIDAD

Al realizar un mapa de elevaciones de la zona estudiada, la cota más alta del área se localiza en Graneros entre 328 y 320 m s.n.m., mientras que la más baja se localiza en Lamadrid entre 295 y 283 m s.n.m. "ver Fig.6". Este aspecto para la localidad de Graneros reduce la posibilidad de haber sufrido una inundación, ya que la escorrentía superficial tenderá a movilizarse según el gradiente hidráulico, hacia zonas de menor pendiente, como lo es Lamadrid. La ubicación que actualmente tiene su tejido urbano posee un alto grado de vulnerabilidad, ya que se encuentra geográficamente en el cono de salida de tres grandes cuencas o áreas de descarga hacia la Vía Principal de Drenaje que tiene el Sistema Marapa-Graneros (Informe CIST, 2017).
Debido a esto, el área de Lamadrid no será utilizada para el establecimiento de la línea base. Cabe aclarar también que se consideró utilizar las superficies nor y nor-noroeste de Lamadrid, en el cruce entre la ruta nacional 157 y la ruta provincial 308, pero luego fue descartada debido a la presencia de pequeños arroyos y zonas anegables cercanas a las mismas, las cuales se pudieron observar mediante imágenes satelitales en diferentes momentos de intensa precipitación.
Las cotas más altas que presenta Graneros se localizan al nornoroeste en cercanías a la ruta provincial 308. Esta característica hace que sea una zona ideal para el estudio, ya que se encuentra en contacto con la ruta y facilita, de este modo, el acceso para la

extracción de las muestras. Se respaldó esta hipótesis mediante el uso de imágenes satelitales que pudieron brindar toda la información necesaria. Para ello se utilizaron las metodologías descritas previamente como NDWI y SARS, las cuales arrojaron como resultados que las áreas, en el período de inundaciones y altas precipitaciones del año 2017 y 2019, no sufrieron anegaciones.

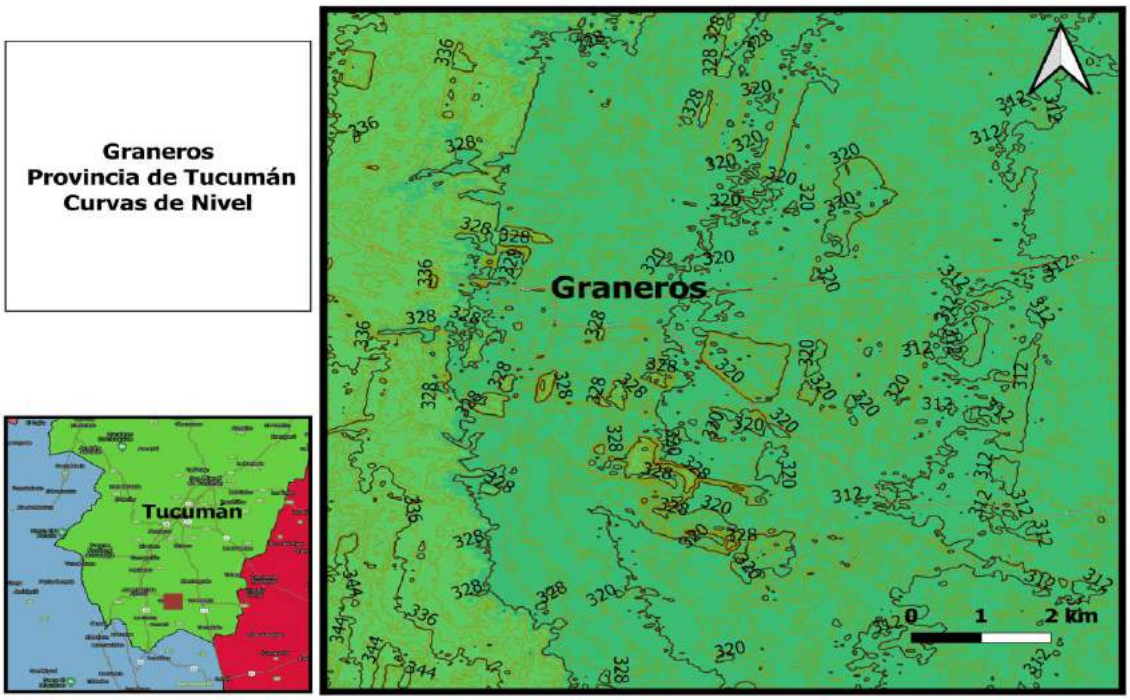


Figura 6. Mapa de curvas de nivel en la localidad de Graneros, Tucumán donde se localiza los puntos de mayor elevación. Elaboración propia.

Análisis de deforestación y alteración antrópica

Se realizó un mapa del avance de la actividad agraria de la zona estudiada con el software *QGis*, utilizando la información de la plataforma Global Forestal Watch, entre los años 2000 y 2019. Con este análisis "ver Fig.7", se muestra la pérdida de vegetación por acción antrópica, representada en intervalos de 4 años e indicada en distintos colores.
Las zonas de mayor intervención antrópica corresponden a zonas con mayor riesgo de inundación debido a la erosión del suelo, el transporte de sedimentos y los caudales de escorrentía. En relación con los verdes claros de la imagen satelital (no coloreado/color verdadero), si bien no existió pérdida de vegetación en el periodo analizado, representa zona alterada previamente por distintos cultivos.

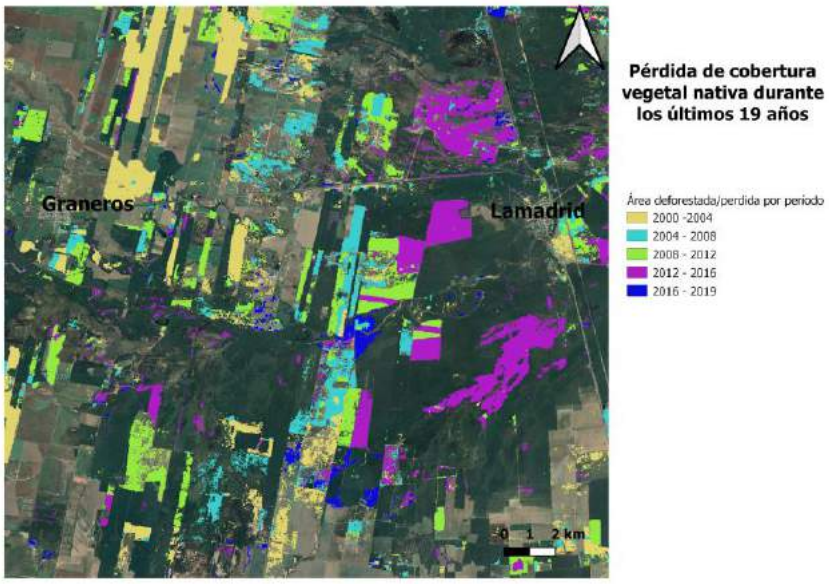


Figura 7. Mapa de pérdida de cobertura vegetal entre las localidades de Graneros y Lamadrid, entre los años 2000 y 2019, Tucumán. La zona de coloración verde oscuro representa la región no afectada, apta para el muestreo. Elaboración propia.

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La clasificación supervisada necesita un correcto criterio de quien asigna los valores a los pixeles para luego determinar las zonas inundadas y para ello requiere de tareas experimentales previas. Las mismas no fueron posibles porque no se pudieron realizar recorridos y relevamientos del lugar y se decidió no continuar con este análisis por el momento. En este sentido, se propone también a futuro un trabajo experimental que incluirá la toma de muestras y su caracterización mediante la técnica LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) que permitirá un análisis cualitativo composicional y asimismo se estudiará la formación de posibles compuestos mediante la caracterización por difracción de rayos X.

ESQUEMA DE MUESTREO PARA LÍNEA BASE

En cuanto a la propuesta de puntos de monitoreo, se eligieron los 4 aspectos más relevantes (accesibilidad, cota, lejanía a zonas anegables, alteración antrópica) junto a su respectiva ponderación, con el fin de analizar 5 posibles ubicaciones mediante el uso de una matriz de decisiones.

Los sitios “ver Fig. 8” fueron calificados de acuerdo con sus aptitudes, las escalas de valor utilizadas para calificar y ponderar las variables de la matriz van desde 1 al 5 (cota y lejanía a zonas anegables) y desde 1 al 3 (accesibilidad y alteración antrópica), significando la máxima puntuación (3 y 5 según corresponda) como la mejor condición, y 1 como la peor condición de cada aspecto.

Luego cada ubicación en sí misma tiene una calificación en cada aspecto que se multiplica con su ponderación, cuya sumatoria tendrá como resultado la valoración final del punto “ver Tabla I”.

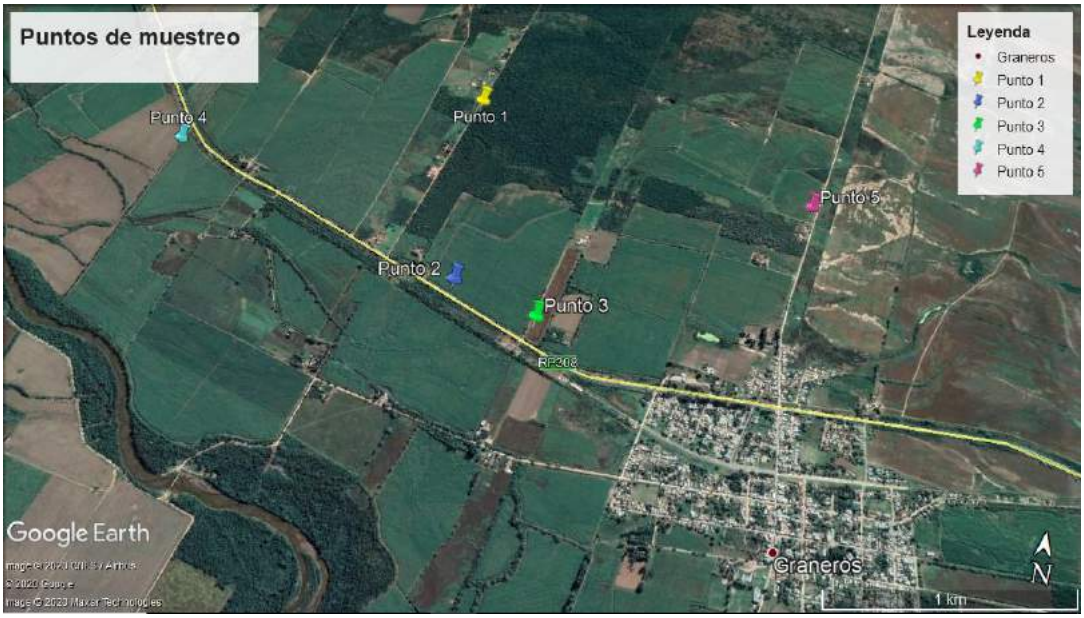


Figura 8. Mapa del área de estudio con la ubicación de los puntos seleccionados como línea de base para el sucesivo muestreo. Elaboración propia.

Tabla I. Matriz de ponderación. Elaboración propia.

	PONDERACION		P1	P2	P3	P4	P5
Accesibilidad	3	VALORACION	3	5	5	2	2
		RESULTADO	**9**	**15**	**15**	**6**	**6**
Cota	5	VALORACION	5	3	3	5	2
		RESULTADO	**25**	**15**	**15**	**25**	**10**
Lejanía	5	VALORACION	5	5	5	3	5
		RESULTADO	**25**	**25**	**25**	**25**	**25**
Alteración antrópica	3	VALORACION	5	3	3	3	3
		RESULTADO	**15**	**9**	**9**	**9**	**9**
TOTALES			**74**	**64**	**64**	**65**	**50**

Los puntos propuestos indican la ubicación a partir de los cuales, y en un radio de 50 metros, serán extraídas las muestras estadísticamente representativas para la determinación del esquema de muestreo para la línea base.

CONCLUSIONES

Las fortalezas del análisis de imágenes satelitales radican en la gran variedad y disponibilidad de catálogos para descargarlas y su posterior procesamiento a través de distintas técnicas de teledetección. La plataforma *Google Earth Engine* y el software *QGIS* fueron apropiados para el análisis de inundaciones, los mismos resultaron de fácil acceso ya que permitieron la selección de los puntos de muestreo para la línea base y el análisis de distintas alternativas.

Como resultado de la matriz de ponderación, se propone el Punto 1 (P1) como la mejor ubicación para realizar el muestreo seguido por los Puntos 2 y 3 (P2 y P3) debido a que obtuvieron el mayor valor de ponderación. Se proponen en segunda instancia los puntos 4 y 5 (P4 y P5) por tener menor valoración total.

Tabla II: Coordenadas de los puntos de muestreo propuesta para establecer la línea de base. Elaboración propia

Leyenda	Latitud	Longitud	Ponderación
1	27° 37' 50.66" S	65° 27' 24.82" O	74
2	27° 38' 27.29" S	65° 27' 20.94" O	64
3	27° 38' 31.54" S	65° 27' 5.79" O	64
4	27° 38' 8.06" S	65° 28' 18.78" O	55
5	27° 38' 3.56" S	65° 26' 21.09" O	50

Como propuesta de mejora se considerará la utilización de imágenes satelitales SAOCOM. Sin embargo, la investigación realizada en el contexto dado brinda las opciones óptimas de muestreo.

REFERENCIAS

Bustamante, J., Díaz Delgado, R., & Aragonés, D. (2005) Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección. 455XI Congreso Nacional de Teledetección, 21-23 septiembre 2005.Puerto de la Cruz. Tenerife.

Díaz, A. M. (2018). Las inundaciones en la provincia de Tucumán: una problemática que se repite. En *las Jornadas Platenses de Geografía y XX Jornadas de Investigación y de Enseñanza en Geografía.* Recuperado de http://jornadasgeografia.fahce.unlp.edu.ar/jornadas-platenses-y-xx-jieg/actas/Diaz.pdf

Díaz Gómez, A. R., & Gaspari, F. J. (2018). Transformación territorial: intensificación agraria y pérdida del suelo en la cuenca del río Marapa, Tucumán, Argentina. Revista De La Facultad De Agronomía, 116(2). Recuperado de https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/6171

Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." Science 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest

Hanqiu Xu (2006) Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, International Journal of Remote Sensing, 27:14, 3025-3033, DOI: 10.1080/01431160600589179

Hussin, Y.A., 1995. Effect of polarization and incidence angle on radar return from urbanfeatures using L-band aircraft radar data. 10-14 July 1995. Paper Presented at the1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS' 95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications.

Leckie, D.G., Ranson, K., 1998. Forestry applications using imaging radar. Principles andApplications of Imaging Radar 2. pp. 435–509

Liao, H.-Y., & Wen, T.-H. (2020). Extracting urban water bodies from high-resolution radar images: Measuring the urban surface morphology to control for radar's double-bounce effect.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 85, 102003. doi:10.1016/j.jag.2019.102003

McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425–1432. doi:10.1080/01431169608948714

Recavarren, P. (2016). La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juarez, Laprida y Gral. La Madrid. Evolución y desafíos a futuro. INTA EDICIONES, inta.gob.ar/sites/default/files/inta_la_produccion_agropecuaria_en_olavarria_juarez_laprida_la_madrid_2016.pdf.

Roessner S., K. Segl, M. Bochow, U. Heiden, W. Heldens & H. Kaufmann (2011). Potential of hyperspectral remote sensing for analyzing the urban environment, In: Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment, Yang X. (ed.), pp. 49-62, Wiley, Oxford

SITIOS WEB CONSULTADOS:

Comisión de Inundaciones en el Sur de la provincia de Tucumán (C.I.S.T.), (2017). http://www.recursoshidricos.gov.ar/webdrh/_docs/CIST-Informe%20Completo.pdf. [Fecha de ingreso: 31/08/20]

https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview [Fecha de ingreso: 25/08/20]

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2 [Fecha de ingreso: 25/08/20]

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO Y CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO EN EL PIEDEMONTE DE LA CUENCA EL POTRERILLO, CATAMARCA, ARGENTINA

Ortíz Grau M. V.[a], Serra M.[a,b], Lamas C.[a], Niz A. E.[a]

[a]*Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental (IMCoDeG), FTyCA, UNCA- San Fernando del Valle de Catamarca, ARGENTINA*
[b] *CONICET, ARGENTINA*

e-mail: vickyortiz1619@gmail.com

RESUMEN

El área de estudio pertenece a la cuenca El Potrerillo que se ubica al sur de la cuenca de El Tala y al oeste de San Fernando del Valle de Catamarca, se accede a ella por de la Ruta Provincial Nº 4 hasta una calle secundaria del barrio residencial La Estancita, desde allí se dirige al SW hasta la zona de estudio. Su litología se caracteriza por metamorfitas y migmatitas con una edad de metamorfismo ordovícica, que alojan una serie de granitoides calcoalcalinos, cubiertos de loesoides en la zona cumbral. Desde el punto de vista estructural se encuentran fuertemente fracturadas, mostrando dos juegos principales de fracturas NNO-SSE y SW-NE, las cuales comandan el drenaje. Presenta un relieve abrupto, marcado por una diferencia de altitud de 2100 m en una distancia de 17 km; por sus características, es un área potencialmente susceptible, no solo de crecidas espontaneas en el periodo estival sino también de procesos de deslizamiento de laderas, y microdeslizamientos, principalmente en la región de la cuenca alta. En la sección media y baja de la cuenca, se adicionan los procesos debidos a la acción antrópica, son comunes los incendios generados por el hombre en el periodo previo a la primavera y espontáneos en el verano, debido a la predominancia de suelos desnudos y calores intensos. En el piedemonte se asienta el Barrio Valle Chico, los cuales son directamente afectados por la acción de los procesos geoambientales mencionados. Se genera, como resultado de esta investigación, la cartografía expresada en mapas de pendiente, vulnerabilidad y susceptibilidad ante el riesgo de origen hídrico con el objeto de proporcionar la información complementaria para mitigar el impacto de estos, y, al mismo tiempo, optimizar el ordenamiento territorial para las futuras ampliaciones de los módulos habitacionales del Complejo Habitacional.

Palabras Clave: Riesgo hídrico, mitigación, ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

La cuenca El Potrerillo ubicada en la Sierra de Ambato, corresponde a la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas Noroccidentales. La misma se encuentra emplazada hacia el SW de San Fernando Valle de Catamarca, capital de la provincia homónima. Esta cuenca drena sus aguas hacia el rio Ongoli, el cual atraviesa la parte SW de la Ciudad con rumbo aproximado N-S.
Corresponde a un área potencialmente susceptible ocasionado por crecidas espontaneas y temporales, en las subcuencas mayores. Y debido a la particular características topográficas de la zona alta de la cuenca se potencian los procesos de deslizamiento de laderas, y microdeslizamientos.

Las áreas cumbrales se encuentran cubiertas por depósitos loesoides, los que son fácilmente erosionables en épocas estivales y evidencian deslizamientos lineales de menor magnitud. En las áreas medias y baja de la cuenca se encuentran fuertemente fracturadas, mostrando dos juegos principales de fracturas NNO-SSE y SW-NE, las cuales comandan el drenaje.
En referencia a su pendiente esta disminuye considerablemente hacia el SE, siendo las zonas de mayor pendiente las que corresponden a los nacimientos de los arroyos, de gran importancia ya que tienen su escorrentía a favor de la pendiente topográfica del terreno, factor importante en cuanto al transporte de sedimentos.
La geomorfología de la zona está dominada por procesos fluviales a lo largo de toda la zona, eólicos y de remoción en las zonas cumbrales.
El área de estudio forma parte de la denominada región de Clima Árido de Sierras y Bolsones, que ocupa la mayor parte de la provincia. Allí se presentan escasas lluvias, aire seco y fuertes vientos del NE, E y SE tanto en primavera como en verano. La precipitación media anual varía entre los 500 y 700 mm en el Este (en algunos sectores las precipitaciones superan los 1000 mm), pero con marcada disminución hacia el O (Puna Cordillerana con menos de 150 mm). Las temperaturas medias anuales son de 25ºC en el E y Centro de la provincia, registrándose marcas de hasta 45ºC en el verano.

OBJETIVOS

Generar el mapa de pendiente, para analizar la vulnerabilidad y susceptibilidad ante el riesgo de origen hídrico, que proporcione información complementaria para mitigar el impacto de estos, y, al mismo tiempo, optimizar el ordenamiento territorial para las futuras ampliaciones de los módulos del Complejo Habitacional.

Ubicación y Vías de Acceso

El área de estudio se encuentra ubicada bajo las coordenadas 28°26'37.93"S 65°53'27.31"O y 28°31'5.29"S 65°52'13.47"O, en la ladera oriental de la Sierra de Ambato, al SW de San Fernando del Valle de Catamarca siendo parte de la gran cuenca del Rio del Valle. Aproximadamente a 7 km desde la desembocadura de la cuenca hasta el centro de la ciudad en línea recta, y a 5 km del Barrio Valle Chico.
Se accede a la zona a través de la Ruta Provincial Nº4 hasta llegar a las inmediaciones de la zona de El Calvario, que se encuentra en el kilómetro 5 a partir de este punto se accede por calle secundaria del barrio residencial La Estancita, desde allí se comienza a caminar en dirección SW hasta la zona de estudio. “Ver Fig 1”
La cuenca limita hacia el Norte con la cuenca del arroyo El Potrero, al NE con la desembocadura de la cuenca de El Tala. Hacia el Este con la ciudad de San Fernando Valle de Catamarca, al SE con las instalaciones del Barrio Valle Chico. En la sección occidental limita con la cuenca de Los Ángeles.



Fig. 1. Imagen de ubicación y vías de acceso

MARCO GEOLÓGICO

Geología Regional

El área de estudio se encuentra emplazada dentro de la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas Noroccidentales, y posee características morfoestructurales propias. Con respecto a los sistemas orográficos y a las provincias geológicas limitan, al N con las Sierras Subandinas, Cordillera Oriental y Puna, al E con la Llanura Chaco-bonaerense, hacia el SW con la Sistema de Famatina, Cordillera Frontal y Precordillera. El basamento constituye las provincias de Tucumán, Catamarca, La Rioja y el sector oriental de San Juan y occidental de San Luis corresponde a un orogeno eopaleozoico (Ramos 1988) caracterizado por metamorfitas y migmatitas con una edad de metamorfismo ordovícica, que alojan una serie de granitoides calcoalcalinos. La estructura ha sido caracterizada por Gonzales Bonorino (1950) quien las considero como un sistema de montañas en bloque con rumbo N-S limitada por fallas inversas de tipo lístricas, es decir, horizontalizándose en profundidad. Se caracterizan por presentar estrechos valles y amplios bolsones alternando con bloques o cordones elevados.

Geomorfología

Las características geomorfológicas están controladas principalmente por las manifestaciones estructurales de las provincias geológicas, para el caso del área que abarca la cuenca estudiada corresponde:

Provincia geomorfológica de las Sierras Pampeanas Noroccidentales: Denominación acuñada por Stelzner (1.873), englobando así una serie de sierras formadas por esquistos metamórficos o cristalinos que sobresalían de las pampas adyacentes. La morfología actual es el resultado del levantamiento a lo largo de fallas inversas de alto ángulo, generadas por la orogenia andina durante el Terciario superior, en las que, las laderas occidentales muestran pendientes bastante más abruptas que las laderas orientales.

METODOLOGÍA

En tareas de gabinete se procedió a la recolección de antecedentes e información referida a la problemática planteada en el área de trabajo como así también, de cuencas

vecinas que nos brinden información para poder determinar los procesos geoambientales dominantes y las características regionales del área de nuestra cuenca de estudio, consultando además informes técnicos, investigaciones, cartas y hojas geológicas obtenidas en múltiples instituciones como el instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental (IMCODEG) de la Facultad de Tecnología y Ciencias, y sitios web como SEGEMAR, USGS, Atlas Catamarca, otros.
Se efectuó el procesamiento de imágenes satelitales utilizando como software predeterminado ArcGIS 10.5 y complementándolo con otros softwares para un análisis más detallado, como Google Earth Pro para la delimitación precisa de los límites de la cuenca, como así también para una vista general a lo largo del tiempo sobre el área de estudio, el sitio de ALASKA para la descarga del DEM, ALOS PALSAR de resolución 12,5m, posteriormente utilizado QGIS y su complemento SAGAGis, ArcGIS para determinar las subcuencas, drenaje y dirección, % de pendientes, parámetros morfometricos, y otras herramientas. Estos softwares fueron utilizados y ejecutados en forma conjunta para los procesamientos sobre las imágenes satelitales y la generación de la cartografía base y final del área de estudio.
Se elaboraron mapas temáticos que permitieron analizar los parámetros físicos, de altura e hídricos, para representar el comportamiento de cada uno de los sectores de la cuenca, entendiendo que la litología, la geomorfología del área y la dinámica fluvial actúan en conjunto para definir el modelado del relieve, y analizar la vulnerabilidad que la cuenca de estudio genera para la población adyacente a su desembocadura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las herramientas SIG utilizadas se pudo determinar los distintos parámetros morfométricos de la cuenca que nos permiten predecir el comportamiento que la misma presenta ante el recurso hídrico. Además, se caracterizó el riesgo en base al mapa de susceptibilidad y % de pendientes, en donde ambos nos ayudaran a estimar el aporte que generan los efluentes de la cuenca al pie de monte y con ello la vulnerabilidad que afecta a la población del barrio Valle Chico.

Las variables que permiten caracterizar las cuencas cuali y cuantitativamente se agrupan en parámetros físicos y de forma, de relieve y de la red de drenaje. La determinación de estos parámetros se obtiene a través de mediciones indirectas.

PARAMETROS FISICOS Y DE FORMA

Constituyen un conjunto de información necesaria para conocer el comportamiento hidrológico de la zona, dentro de las cuales se logró analizar parámetros generales de la cuenca y su forma.

La cuenca El Potrerillo se subdivide en 4 subcuencas, en base a la clasificación por rango de área de Campos Aranda (1992), todas las subcuencas corresponden a microcuencas por tener un rango menor de 25 Km^2. De ellas la subcuenca 1 y 3 son las que presentan las mayores áreas y que coinciden con las zonas de mayor altura encontradas en la cuenca, ambas tienen en su zona cumbral fuerte relieve y pendientes pronunciadas. “VerFig.2”. En relación al Factor de Forma de Horton (Kf) indica cual es el grado de alargamiento de la cuenca, como en las subcuencas 1, 2 y 4 el Kf es bajo, tendrá menor probabilidad de recibir lluvias intensas y simultáneas sobre la totalidad de

su superficie y por ende menos propenso a crecientes de gran magnitud que una de la misma área y mayor factor (Henao Sarmiento, 1988). La subcuenca 3 tiene un factor más cercano a 1 por ende es alargada con tendencia a circular.

El Kc de las subcuencas está comprendido entre 1,40 y 1,50, en la tabla de Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius (Gaspari et al., 2020) se corresponde con una forma oval redonda a oval oblonga. "VerTabI" Al acercarse progresivamente a 1,75 nos indicarían cuencas con tendencias alargadas, al igual que el parámetro anterior, y cuanto más cercano a la unidad se encuentre el valor la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, ya que tiene la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, en el caso de las subcuencas son de peligrosidad intermedia siendo entre ellas la subcuenca 2 la de mayor tendencia a la peligrosidad.

Tabla I – Representación de parámetros morfométricos.

SUBCUENCA 1	
Parametro Fisico	Medida
AREA DE LA CUENCA (Ac)	10 Km2
PERIMETRO DE LA CUENCA (P)	17,1Km
LONGITUD DE CUENCA (Lc)	3,9Km
ANCHO DE LA CUENCA (W)	2,5Km
LONG DEL CURSO PRINCIPAL (L)	5,7 Km
LONG TOTAL DE DRENAJE (Ln)	25,2 Km
Parametro Forma	
FACTOR DE FORMA DE HORTON(Kf)	0,31
INDICE DE COMPACIDAD(Kc)	1,52
RELACION DE ENLONGACION(Re)	0,92
RELACION DE CIRCULARIDAD (Rci)	0,43

SUBCUENCA 2	
Parametro Fisico	Medida
AREA DE LA CUENCA (Ac)	4,3 Km2
PERIMETRO DE LA CUENCA (P)	10,3 Km
LONGITUD DE CUENCA (Lc)	2,5 Km
ANCHO DE LA CUENCA (W)	1,7 Km
LONG DEL CURSO PRINCIPAL (L)	4,1 Km
LONG TOTAL DE DRENAJE (Ln)	18,9 Km
Parametro Forma	
FACTOR DE FORMA DE HORTON(Kf)	0,25
INDICE DE COMPACIDAD(Kc)	1,40
RELACION DE ENLONGACION(Re)	0,94
RELACION DE CIRCULARIDAD (Rci)	0,50

SUBCUENCA 3	
Parametro Fisico	Medida
AREA DE LA CUENCA (Ac)	5,3 Km2
PERIMETRO DE LA CUENCA (P)	12,1 Km
LONGITUD DE CUENCA (Lc)	3 Km
ANCHO DE LA CUENCA (W)	1,7 Km
LONG DEL CURSO PRINCIPAL (L)	3,4 Km
LONG TOTAL DE DRENAJE (Ln)	21,2 Km
Parametro Forma	
FACTOR DE FORMA DE HORTON(Kf)	0,44
INDICE DE COMPACIDAD(Kc)	1,48
RELACION DE ENLONGACION(Re)	0,87
RELACION DE CIRCULARIDAD (Rci)	0,45

SUBCUENCA 4	
Parametro Fisico	Medida
AREA DE LA CUENCA (Ac)	2,6 Km2
PERIMETRO DE LA CUENCA (P)	8,6 Km
LONGITUD DE CUENCA (Lc)	2,7 Km
ANCHO DE LA CUENCA (W)	0,98 Km
LONG DEL CURSO PRINCIPAL (L)	3,3 Km
LONG TOTAL DE DRENAJE (Ln)	13 Km
Parametro Forma	
FACTOR DE FORMA DE HORTON(Kf)	0,24
INDICE DE COMPACIDAD(Kc)	1,49
RELACION DE ENLONGACION(Re)	0,68
RELACION DE CIRCULARIDAD (Rci)	0,44

PARAMETROS DE LA RED DE DRENAJE

Estas variables explican la configuración y el comportamiento del drenaje, asimismo aportan información de las características del sustrato y de las superficies de las cuencas, consecuentemente son parámetros relevantes para lograr una visión más exhaustiva de su comportamiento.

Se empleo la clasificación de Way (1978), la cual se basa en la densidad de corriente, textura y forma para obtener el tipo de drenaje de la subcuenca. Con lo referido a la densidad de drenaje, se comparó los resultados con la tabla de clasificación de densidad de drenaje de Fuentes Junco (2004), ya que se considera la más adecuada para el tamaño de las subcuencas, esta dio como resultado una densidad de media a alta, lo que indica que el drenaje de la cuenca es altamente jerarquizado, lo que se corresponde con una litología granítica/metamórfica altamente fracturada/foliada, lo cual se manifiesta a través de un intenso control estructural en el escurrimiento superficial "Ver.TabII". Según el método de clasificación de R. E. Horton (1945) el orden de los causes en la desembocadura de las subcuencas es de 4, así mismo estos se unen en la parte baja del área pedemontana conformando un orden 5 "VerFig.3".

Tabla II – Clasificación del tipo de drenaje y densidad de las subcuencas

	Tipo de drenaje	Densidad del drenaje
Subcuenca 1	Dendritico	2,52
Subcuenca 2	Rectangular	4,40
Subcuenca 3	Angulado	4
Subcuenca 4	Angulado	5

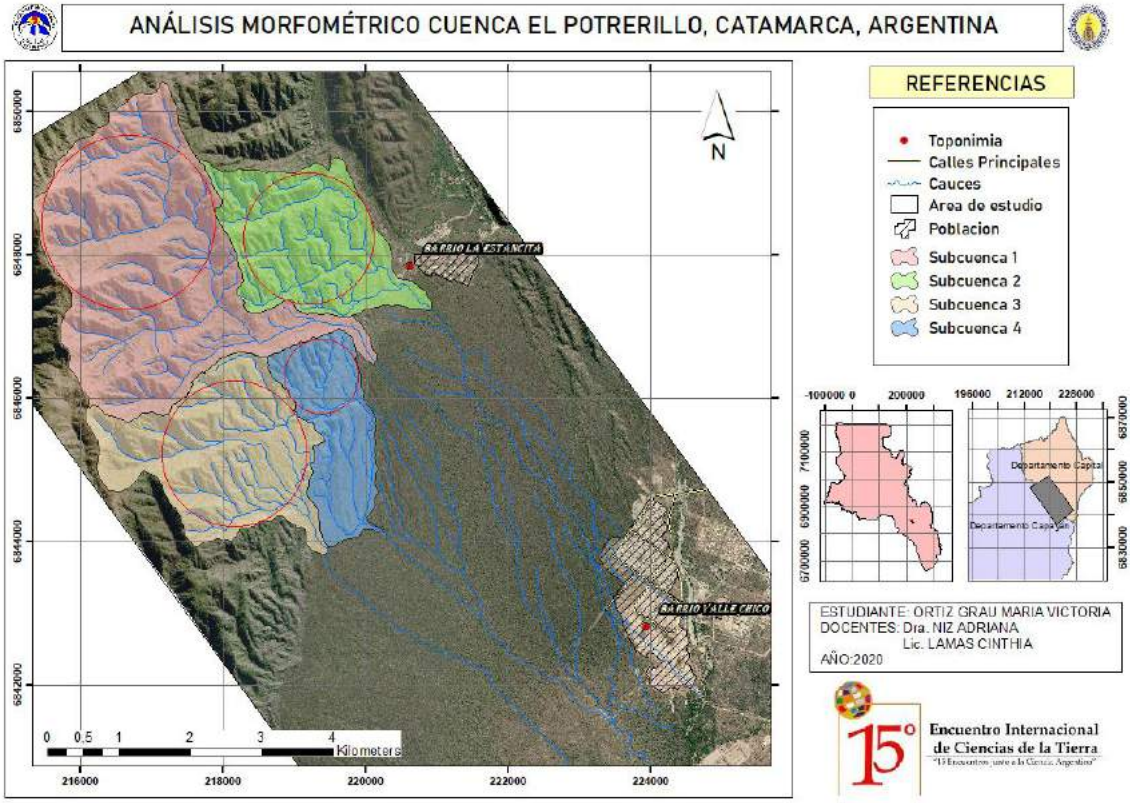


Fig. 2. Mapa de análisis morfométrico

PARAMETROS DE RELIEVE

El relieve constituye uno de los parámetros más importantes para el comportamiento hidrológico de una cuenca, ya que ello condiciona el escurrimiento, infiltración, velocidad de escorrentía, entre diversos factores más.

En la cuenca se determinó una altura máxima de 2046 m.s.n.m. correspondiente a la subcuenca 1 y una altura mínima de 667 m.s.n.m. correspondiente a la subcuenca 4. Su desnivel altitudinal general 1379 m.s.n.m., de las cuales la subcuenca 1 y 3 presentan los mayores desniveles, 1202 y 1083 m.s.n.m. respectivamente. En la sección NW de la cuenca se encuentran las áreas de terreno más susceptibles a factores meteorológicos y erosivos.

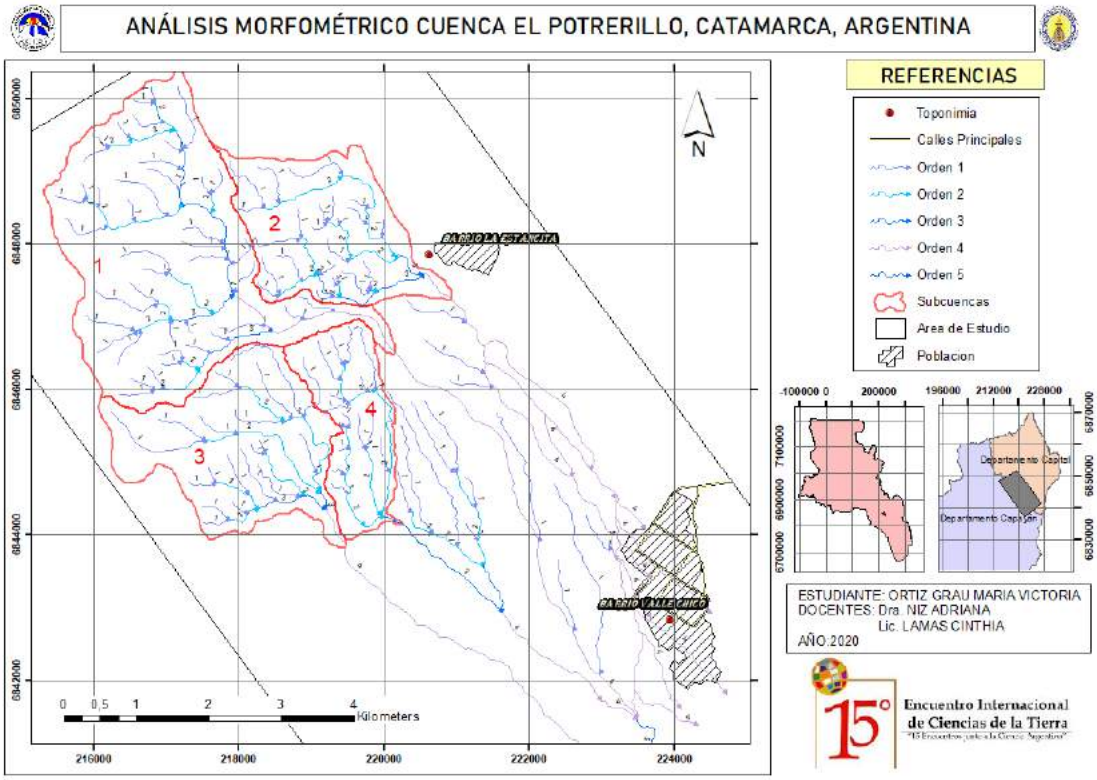


Fig. 3. Mapa de clasificación de drenaje

Con el mapa de relieve es posible, además, visualizar rápidamente la zonificación de la energía de los cauces; ya que la zona de color rojo indica el área donde domina la erosión en la cuenca, la zona de color verde el dominio de procesos de transporte, la zona de color celeste es el área donde predomina la acumulación y retransporte. Por su parte, la zona amarilla es de transición entre la erosión y transporte. En el área de color blanco, son frecuentes los procesos de gelifracción, porque son las zonas más altas correspondientes con ambientes más fríos en la región “VerFig.4”.

En el mapa de pendientes, se reclasifico el DEM utilizando la clasificación de pendientes de López Cadenas de Llano (1998) , obteniendo un porcentaje que ubica la cuenca en un terreno accidentado desde su parte media hasta la cúspide, evidenciando un relieve escarpado, principalmente en las zonas cumbrales de cada subcuenca, lo que pone de manifiesto la intensa acción erosiva que se traduce en transporte de sedimentos hacia los cauces colectores y, desde ellos, hacia la desembocadura lo cual puede implicar, por un lado, colmatación de cauces en el ápice o bien, probabilidad de endicamiento en los ríos principales de la zona cumbral ante precipitaciones extraordinarias, con el consecuente proceso de aluvionamiento o procesos de remoción en masa general. Esto en conjunto permite visualizar el desnivel altitudinal “VerFig.5”.

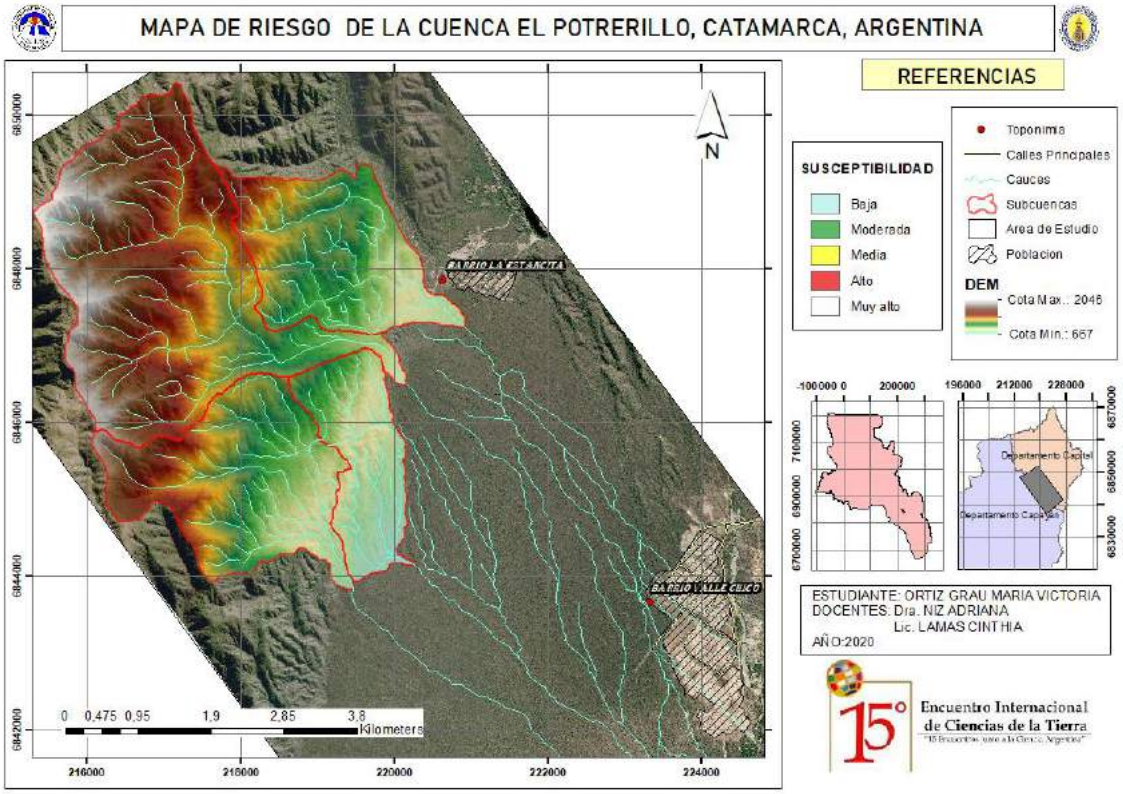


Fig. 4. Mapa de susceptibilidad de pendientes

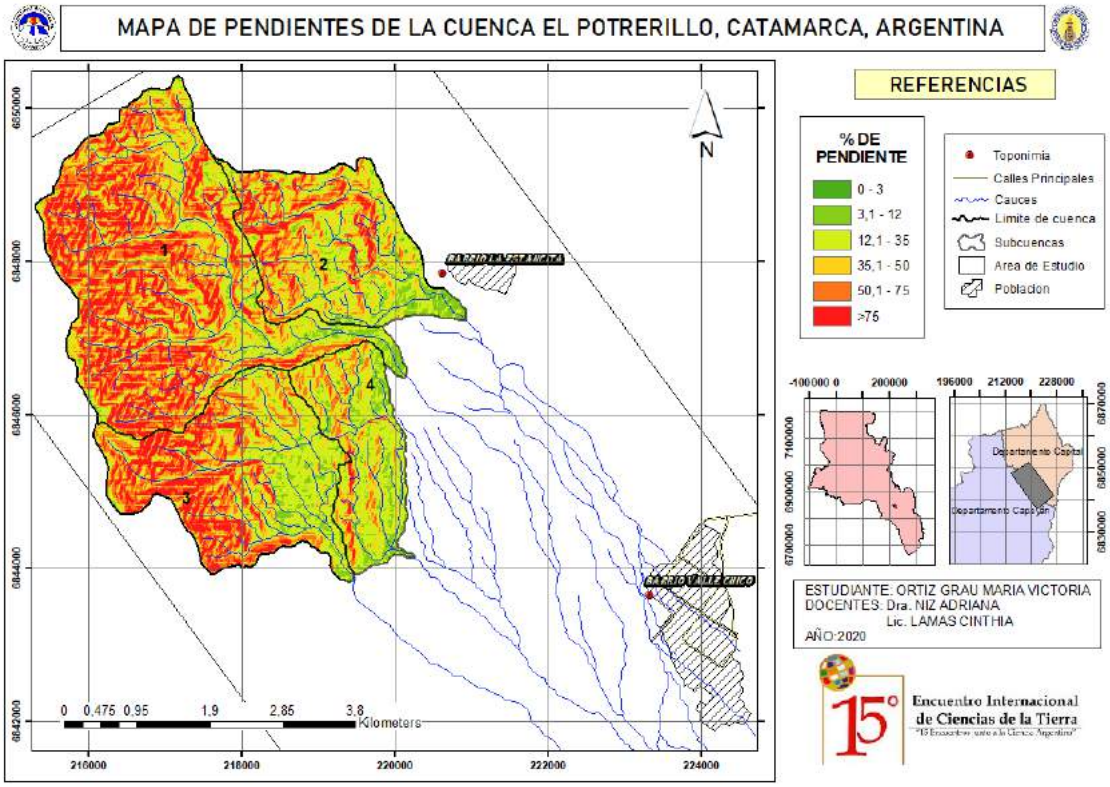


Fig. 5. Mapa de clasificación de pendientes.

CONCLUSIONES

La cuenca del rio Potrerillo se integra de un conjunto de subcuencas con características particulares que inciden de manera diferente en el comportamiento del colector principal, especialmente en la desembocadura de la misma. Ese comportamiento será potencialmente riesgoso para el B° Valle Chico que se sitúa en la zona distal del piedemonte.

En función del área de la cuenca que pudiera recibir precipitaciones concentradas y/o extraordinarias, será la respuesta del relieve que lo tornara en una amenaza paralelo Barrio Valle Chico, que según sea el área impactada se constituirá en un riesgo de anegamiento. Para una mejor comprensión de la dinámica de la cuenca se la ha subdividido en las cuatro subcuencas más destacables.

Las subcuencas 1 y 2 representan el mayor riesgo para la comunidad que habita el Barrio, en estas cuencas, con una forma subredondeada a redondeada, donde el diseño de drenaje nos indica que están muy controlados por la estructura y, como resultado de la jerarquización de Horton, se tiene una alta densidad de drenaje, con el dominio de los procesos erosivos, que se traducen en el arranque y traslado de material desde las laderas a los colectores.

La capacidad de proporcionar material detrítico a los cauces, puede derivar en un endicamiento en la zona cumbral, con el consecuente desarrollo de aluviones, en caso de una tormenta extraordinaria. Lo mencionado se potencia en el hecho de que, debido a la presencia de las pendientes escarpadas de las zonas cumbrales, que están propensas a la meteorización y procesos geomorfológicos de remoción o deslizamiento en masa

Otra consecuencia de la sedimentación en caso de precipitaciones torrenciales en épocas estivales, es que arrastran grandes cantidades de material que puede ser acumulado en el quiebre de pendiente, es decir, en la zona alta del piedemonte, llegando el agua que supere la infiltración a través del cono aluvial a los módulos habitacionales.

La cuenca 3 tiene más capacidad para recibir mayor cantidad de agua de acuerdo a su forma sin embargo la tendencia del rio en la desembocadura de la cuenca y su trayecto por el piedemonte se encuentran alejados de los módulos habitacionales actuales del barrio, por lo que, por el momento, no implican un riego potencial, sin embargo, es menester advertir de la necesidad de estudios de detalle en la presunción de futuros asentamientos urbanos en esa área de piedemonte.

La subcuenca 4, si bien se puede considerar una amenaza por la dinámica geomorfológica, no implica amenaza que pueda devenir en un riesgo de anegamiento y/o inundación, debido a que sus terrenos son algo accidentados, pero por su forma el agua tiende a dar cauces estables en alguna crecida espontanea.

REFERENCIAS

Acuña Leiva, C. I. (2019). Caracterización Geomorfológica y evaluación del riesgo Geoambiental de la subcuenca arroyo El Potrero –cuenca del río El Tala – Catamarca. Trabajo Final de Licenciatura. UNCA

Caminos, L. F. (s.f.). (2006). Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250000. Hoja geológica San Fernando valle de Catamarca 2966-II

Caminos, R. (1999). Geología Argentina. Buenos Aires

Campos Aranda, D. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.

Fuentes Junco, J. J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. México: Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE).

Gaspari, F. J., Delgado, M. I. & Senisterra, G. E. (2009). Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense, Argentina. GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (9), 67-82.

Gravelius, H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Compendium of Hydrology. Berlín: Goschen.

Niz, A. y Savio, M. Geomorfología general de la provincia de Catamarca. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán: 804-828 (2017).

Niz, A.; Savio, M. (2017) Geomorfología general de la provincia de Catamarca e identificación de los riesgos geoambientales predominantes. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, Tucuman.

Ortiz Grau, M.V. y Niz A. (2019). Caracterizacion Geomorfologico-Hidrologico de la Cuenca El Potrerillo y su impacto en el Barrio Valle Chico, Catamarca- Argentina. Encuentro International Center for Earth Sciences (ICES) E-ICES 14- Comisión Nacional de Energía Atómica. San Rafael Mendoza.

Sitios web consultados:

http://www.atlas.catamarca.gov.ar/

https://sigam.segemar.gov.ar/

https://www.usgs.gov/

https://search.asf.alaska.edu/#/

ESTUDIO EVOLUTIVO DE LOS MALLINES DEL NORTE NEUQUINO A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL Y CLIMATOLÓGICA

Ostertag G., Tesoniero M. A., Bertani L. A. y Caso M.

Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades,
Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA

e-mail: griostertag@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del estudio es analizar los cambios en el tamaño de los mallines en relación a variables climáticas, precipitaciones pluviales y nivales, tomando como representativas dos estaciones meteorológicas próximas al área de estudio. Los mallines considerados, se localizan entre 1300 y 1700 m s.n.m. en proximidades del paraje Invernada Vieja del Departamento Minas en la Provincia del Neuquén. Fueron seleccionados 10 mallines, seis de los cuales se ubican sobre una meseta, y los cuatro restantes en las laderas del valle del río Neuquén. En cada uno de ellos se aplicaron técnicas de teledetección, a través del cálculo de NDVI, para estimar su tamaño y relacionarlo con las precipitaciones del área. A partir del análisis de correlación múltiple se midió la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las variables cuantitativas, detectando en todos los casos que la fuerza de la relación es positiva, cuando aumenta la precipitación, el tamaño de los mallines también aumenta. Sin embargo estas correlaciones entre humedad y tamaño no siempre son lineales. Ocurre que en algunos casos, los cursos de agua que les aportan su humedad, están originados en acuíferos que proceden de otras zonas. La variabilidad de los mallines de meseta tiene buena correlación con la precipitación anual de la región. Dentro de ellos se destaca el que se localiza a mayor altura, que presenta buena correlación con las precipitaciones nivales, lo que indica que sobre los 1600 m s.n.m. la nieve explica mejor el comportamiento de los mallines. En los mallines de ladera la relación con las variables analizadas es más débil. Estos responden mejor al aporte de agua proveniente de los acuíferos próximos.

Palabras Clave: mallines, imágenes satelitales, análisis estadístico.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo forma parte de un proyecto general que se desarrolla en el ámbito de la Universidad Nacional del Comahue, y que tiene como propósito el estudio de las áreas de vegetación del norte de la Provincia de Neuquén, a través de la aplicación de técnicas de teledetección. Cuenta con el aval y el financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Técnica de esta Universidad.

Considerando este marco de referencia, en esta instancia, el objetivo, es estudiar la relación existente entre el tamaño de los humedales, localmente llamados mallines, y las variables climáticas, precipitaciones pluviales y nivales.

Estas oscilaciones se reflejan en el paisaje y son captadas por las imágenes satelitales y están ligadas a la presencia de humedad, ya sea en el suelo o en la atmósfera, en forma de lluvia o nieve, y a la distribución estacional de las precipitaciones en cada ciclo hidrológico. La importancia de estos cambios en la superficie estará sujeta a que tan

húmedo o seco son dichos períodos, cuantos años persiste el fenómeno, y la distribución de las precipitaciones en el año.
Además de los procesos naturales que los caracterizan, estos humedales sufren impactos como resultado de la acción humana por la sobreexplotación. De ello dieron cuenta distintas instituciones y/o autores (Bertani, L. 2011, INTA, 2008, etc.). El uso para la ganadería extensiva es el motivo principal, no el único, que ha llevado a su estado de degradación.

AREA DE ESTUDIO

El territorio estudiado ocupa una superficie de unas 23.000 Ha. y para su delimitación se aplicó el criterio de cuencas, ya que los mismos desaguan hacia el río Neuquén, principal curso hídrico de la zona "ver Fig. 1". Este lugar se encuentra próximo a la localidad de Las Ovejas y al paraje Invernada Vieja. Se trata de 10 mallines "ver Tabla I", seis de los cuales se localizan sobre un sector de meseta, y los cuatro restantes en las laderas superiores del valle del río Neuquén. Los primeros tienen mayores cotas y menores pendientes y ocupan una superficie promedio de 28ha cada uno. Los cuatro restantes tienen una superficie promedio de 8 ha. Los mallines de meseta, además de las precipitaciones, reciben aportes de pequeños cursos de agua que proceden de los sectores altos. Mientras que los otros se alimentan de acuíferos que afloran en la ladera.
La superficie que ocupan es variable dependiendo de la precipitación anual acumulada. Una característica común a todos ellos, es que están ubicados en tierras fiscales, con baja inversión en tecnología (ausencia y/o deterioro de alambrados, carencia de buenos accesos, etc.). Aquellos que están localizados en las laderas del río Neuquén están próximos a la ruta provincial 43, por donde circulan los arreos en tránsito a la veranada.

Tabla I. Mallines

N° de Mallín	X	Y	Superficie Ha	Cota m.s.n.m MDT-IGN	Observaciones
1	36°52'51.79"S	70°47'28.24"O	7,83	1443,00	A° Collinco
2	36°53'53.32"S	70°45'58.87"O	11,28	1474,50	Vega La Trinchera
3	36°52'46.49"S	70°52'40.49"O	15,42	1517,50	Próximo A° La Puntilla.
4	36°53'10.60"S	70°44'54.55"O	7,17	1526,50	Próximo A° La Puntilla
5	36°52'29.33"S	70°44'21.64"O	40,26	1507,00	Puesto y camino en el interior-Vega Cayo Vilú
6	36°56'05.23"S	70°43'35.63"O	87,45	1674,15	A° La Puntilla
7	36°56'11.11"S	70°42'47.80"O	3,45	1412,50	Colindante a Ruta Provincial N°43
8	36°55'07.76"S	70°42'35.85"O	10,17	1376,50	a 500 m de la RP43 y a 300 m de Puesto
9	36°53'29.80"S	70°42'28.12"O	12,01	1333,50	Colindante a Ruta Provincial N°43
10	36°52'27.21"S	70°42'09.71"O	6,08	1385,50	270 m Sur hay Puesto, 570 m SO Puesto

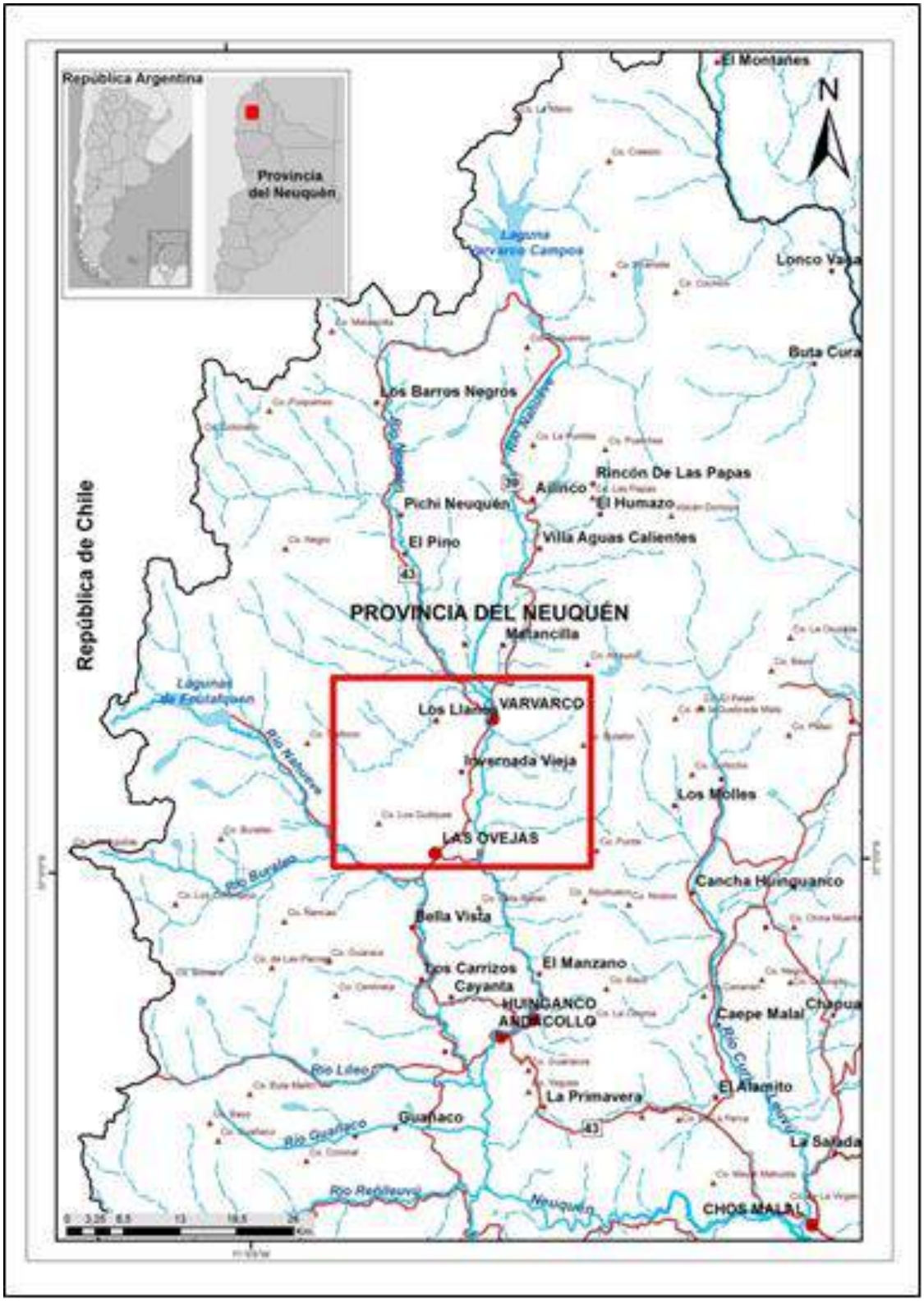


Figura 1. Ubicación del área de estudio

EL CLIMA DEL NORTE NEUQUINO

El área de estudio, ubicada en latitudes medias, entre 36° y 39° Lat. Sur, recibe la influencia del cinturón Subtropical de Altas Presiones, ubicado en el Océano Pacífico y de las bajas presiones subpolares. Estas condiciones del sistema océano-atmósfera y la presencia de la Cordillera de los Andes con su efecto orográfico, favorecen la ocurrencia de abundantes precipitaciones. Caracteriza la región el marcado gradiente oeste-este, más de 3000 mm anuales en alta montaña, disminuyendo a sotavento hasta 200 mm al este del territorio neuquino.

La cuenca responde a un régimen pluvionival. A partir del mes de abril y durante el invierno se registran precipitaciones con acumulación de nieve en montaña. En primavera con el desplazamiento latitudinal del Cinturón Subtropical, comienza a disminuir el aporte de humedad desde el Océano Pacífico y el ascenso de las temperaturas dan lugar al proceso de fusión con el consecuente aporte de humedad al área y el aumento de escurrimiento en arroyos y cauces de la cuenca.

La variabilidad en el acumulado anual de precipitaciones en la cuenca, tiene un rango amplio. Esto puede observarse en la Estación Los Carrizos con un valor medio de 888 milímetros anuales, el máximo corresponde al año 2005 con 1591 mm anuales mientras que el año 1998 registró el mínimo histórico con un acumulado de 403 mm anuales. El desvío estándar para la serie 1908-2018 es de 325 mm. “ver Fig. 2”.

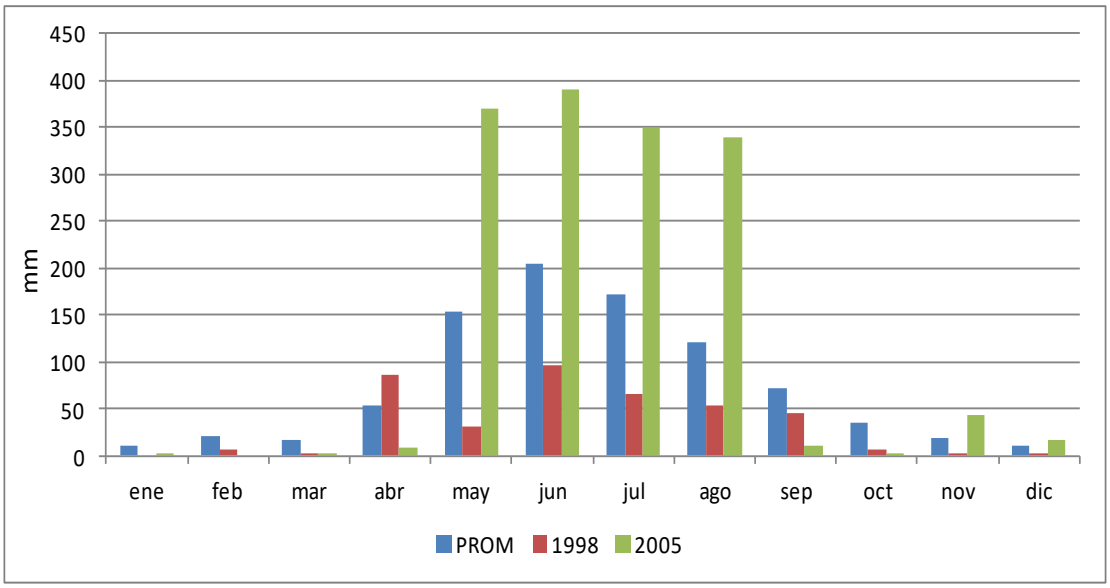


Figura 2. Promedio, máximo y mínimo de precipitación en Los Carrizos datos de la Estaciones Hidrometeorológicas. AIC**.**

GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO

Las Andesitas Quebrada Honda y Tilhue se localizan en la parte superior del paisaje, en el sector de mesetas. Allí están ubicados los mallines del 1 al 6. El resto de las unidades, de litología más heterogénea, forman parte de las laderas del valle del río Neuquén, donde se ubican los mallines 7, 8, 9 y 10.

Tabla II. Unidades geológicas presentes en el área de estudio

Unidad	Edad	Tipo de Rocas
Formación Arroyo Palao	Mioceno inferior	Arcilitas, arcilitas calcareas
		areniscas
Formación Invernada Vieja	Mioceno medio	Tobas y aglomerados andesíticos
Formación Cajón Negro	Plioceno Inferior	Aglomerados volcánicos andesíticos
Andesita Quebrada Honda	Plioceno Inferior	Andesitas y basandesitas
Andesita Tilhue	Plioceno superior	Andesitas, dacitas, tobas y
	Pleistoceno inferior	Aglomerados volcánicos

Fuente: Hoja Geológica 3772 – II "Las Ovejas" Segemar (2001)

Sobre el sector de mesetas hay buen desarrollo edafológico donde es común encontrar la presencia de ceniza volcánica en los horizontes superficiales. El sector de laderas posee similares características aunque con notables discontinuidades, como consecuencia de la erosión a la que están sometidos los suelos. Por ello es común encontrar sectores con asomos rocosos.

Uno de los aspectos clave para entender la dinámica del paisaje lo constituye sus características topográficas: en los sectores de meseta predominan pendientes más suaves y es común la presencia de pequeñas depresiones (mallines 1 a 6), mientas que en las laderas del valle del río Neuquén (mallines 7 a 10), las pendientes son continuas y de mayor gradiente, hasta llegar a las planicies del propio río Neuquén. Teniendo en cuenta esto se puede hacer una caracterización de las relaciones entre los siguientes elementos del medio natural:

En el sector de planicies de origen volcánico el funcionamiento sistémico es el siguiente:

- A través de las diaclasas del sustrato rocoso, se produce la recarga de los acuíferos.
- La cobertura vegetal en situación normal oscila entre el 40 y 60 %. Esto también favorece la infiltración sobre el escurrimiento.
- Los suelos originados en ceniza volcánica poseen buena capacidad para retener la humedad.
- Un alto porcentaje de la precipitación es de tipo nívea. Esto también ayuda a la infiltración.
- La altura media de estas planicies (1.500 m s.n.m.), incide en el menor índice de evapotranspiración que en los mallines de ladera.

MÉTODOS

La secuencia metodológica contempló la selección de los distintos sitios a estudiar, 10 en total. Cada uno de estos lugares contiene un mallín y un área perimetral a modo de buffer, para poder medir la posible expansión del mallín en los años húmedos. En total suman una superficie de 201,12 Ha.

Para la selección de los mallines se tuvo en cuenta:

a) que no haya intervención humana;

b) que en lo posible no tengan límites abruptos; para facilitar la observación de su expansión en años húmedos.

Dentro de estas 10 áreas fue calculado el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) entre los años 1986 y 2017.

Para el procesamiento y análisis de las imágenes (tanto raster como vectorial) se utilizó el software libre QGIS 2.18.2. El sitio elegido para realizar la descarga de las imágenes satelitales es el Earth Explorer, administrado por el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS, por sus siglas en inglés). La búsqueda de las imágenes se realizó para los meses de enero-febrero de cada año, dado que dicho período es menos probable la presencia de nieve. Durante los 30 años de estudio los sensores satelitales fueron evolucionando, lo que llevó a trabajar con imágenes Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI, correspondientes a escenas del path/row 232/086, con un porcentaje de nubes inferior al 5%. Sin embargo hay que destacar que para todas ellas el tamaño del pixel en tierra, campo de visión instantánea (CVI) no cambia: 30 m. En este trabajo se aplicó el índice NDVI desarrollado por Rouse et al, 1974. Utiliza el comportamiento radiométrico (visible e infrarrojo) de la vegetación, que permite conocer un coeficiente de cobertura. Los valores obtenidos oscilarán entre -1 y 1, correspondiendo -1 a sectores con ausencia de vegetación y 1 con máxima cobertura. Los valores intermedios reflejan gradualidad de cobertura. Para este análisis se entiende que el mayor valor del NDVI es indicador de años más húmedos y mayor superficie del mallín. El método empleado consistió en relacionar resultados del NDVI con distintas variables climáticas, para el período 1986-2017, en cada uno de los mallines seleccionados. El tratamiento estadístico de los registros de precipitación contempló la utilización del coeficiente de correlación múltiple (Coeficiente de correlación de Pearson), para entender la incidencia de las lluvias y equivalente de agua nieve (EAN) en cada uno de los mallines. A tal efecto se consideraron las lluvias y EAN como variables independientes (x), mientras que los valores de NDVI constituyeron la variable dependiente (y).
Se utilizaron series de datos de variables meteorológicas provistos por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro. Para ello se seleccionaron las estaciones más representativas de las características climáticas del área de estudio:

Estación Los Carrizos, 37,12° Lat. Sur y 70,76° Long. Oeste, Altitud 1233 m.s.n.m. variable analizada: lluvias

Estación Buta Mallin, 37,22° Lat. Sur y 71,10° Long. Oeste, Altitud 1966 m.s.n.m. variable analizada: equivalente de agua en la nieve (EAN)

Se trabajó con la serie de datos desde el año 1980 hasta 2018 -38 años- para analizar la dinámica de las lluvias y la nieve en el área de estudio e interpretar su influencia sobre el comportamiento de los mallines.
Las series consideradas son:

- precipitación total anual de la estación Los Carrizos;
- precipitación estacional abril-agosto de Los Carrizos;
- precipitación estacional septiembre-marzo de Los Carrizos;
- equivalente de agua en la nieve, máximo anual, de la estación nivológica de alta Montaña Buta Mallín;
- equivalente de agua en la nieve del mes de noviembre de la estación Buta Mallín.

El análisis estadístico contempló el cálculo del coeficiente correlación (Pearson) que calcula la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las variables cuantitativas: tamaño del mallín versus cada una de las variables climáticas consideradas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla III, se consigna el grado de correlación entre las variables consideradas y cada uno de los mallines en estudio.

Tabla III. Coeficiente de Correlación

	Nieve máxima anual Buta Mallin	Nieve en Noviembre Buta Mallin	Pp. anual Los Carrizos	Pp. abr-ago Los Carrizos	Pp sep-dic Los Carrizos
Mallin 1	**0,41**	**0,43**	**0,58**	**0,50**	**0,34**
Mallin 2	**0,47**	**0,32**	**0,49**	**0,38**	**0,39**
Mallin 3	**0,47**	**0,31**	**0,47**	**0,39**	**0,26**
Mallin 4	**0,43**	**0,32**	**0,47**	**0,34**	**0,47**
Mallin 5	**0,49**	**0,33**	**0,56**	**0,45**	**0,42**
Mallin 6	**0,57**	**0,40**	**0,52**	**0,43**	**0,34**
Mallin 7	**0,36**	**0,40**	**0,19**	**0,09**	**0,42**
Mallin 8	**0,25**	**0,02**	**0,06**	**0,01**	**0,18**
Mallin 9	**0,34**	**0,16**	**0,40**	**0,35**	**0,25**
Mallin 10	**0,51**	**0,07**	**0,45**	**0,39**	**0,27**

Las variables que mejor explican la variabilidad del tamaño de los mallines son, la precipitación total anual y la acumulación anual de nieve, con valores de correlación entre 0,40 y 0,60.

Los mallines 1 y 5 presentan la mejor correlación con la precipitación, mientras que el comportamiento del mallín 6 es mejor explicado por la acumulación nival, lo que puede estar directamente relacionado con la altura del mismo, es el de mayor altitud.

En los mallines de **ladera** la relación con las variables analizadas es más débil, con valores de Pearson más bajos, pero siempre positivos (+humedad + tamaño). A modo de interpretación e inferencia estos mallines responden mejor al aporte de agua proveniente de los acuíferos (hidroapoyo) localizados en la ladera del valle del río Neuquén. Esto depende a su vez cuan distante se localizan las zonas de recarga y como es la composición litológica de las rocas por donde fluye el agua.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los datos analizados puede indicarse que existe una buena correlación entre las precipitaciones (lluvias y E.A.N) y los valores de NDVI (que reflejan el tamaño del mallín).

A partir del análisis de correlación entre las variables consideradas y los valores de NDVI, pudo establecerse que existen otros factores que explican la variación del tamaño de los mallines. Uno de ellos, su localización, se trata de mallines de ladera (por ejemplo, los mallines 7 y 8), que se originan en vertientes naturales, lo que implica un tiempo de respuesta mayor, respecto a aquellos que dependen básicamente de las lluvias.

El año 1999 registra las menores superficies de los mallines estudiados. Este comportamiento se explica por las características del ciclo hidrológico 1998, que clasifica como extraseco (Tesoniero et al. 2019)

En igual sentido el año 2017 arroja valores bajos de superficie para los mallines, lo que guarda relación con lo ocurrido en el 2016 (año extraseco).

La variabilidad de los mallines de **meseta** tiene buena correlación con la precipitación anual de la Estación Los Carrizos. En la totalidad de ellos se refleja esta situación con valores de correlación que oscilan entre 0,46 y 0,59. Dentro de los mallines de meseta se destaca el N° 6, de mayor altura que el resto, que correlaciona muy bien con el EAN máximo anual de la estación Buta Mallín (0,57).

Este último dato es de suma importancia debido a que puede considerarse que por sobre los 1600 m s.n.m. la nieve explicaría mejor el comportamiento de los mallines. Por tratarse de un solo caso queda abierta la posibilidad de ampliar el estudio para corroborar esta afirmación.

La posibilidad de contar con imágenes satelitales de más de 30 años de antigüedad ha permitido realizar un seguimiento de la evolución del tamaño de los mallines. Las mismas mostraron eficiencia, teniendo en cuenta el nivel de resolución espacial que poseen (30 m), de acuerdo al tamaño de los objetos estudiados que por lo general ocupan varias hectáreas. En el mismo sentido el NDVI mostró muy buena eficacia para reflejar los cambios que operan en los mallines. Uno de los objetivos del proyecto general es entender como impacta el cambio climático en los mallines del norte de la Patagonia. De acuerdo a los datos considerados en el presente trabajo, no fue posible obtener una conclusión definitiva. Sin embargo indicadores regionales como el descenso de los niveles de espejos de agua o la desaparición de pequeños glaciares, estarían explicando que la reducción de la superficie de algunos mallines puede estar asociada al cambio climático.

Los mallines constituyen un recurso natural muy valorado para la actividad humana en la Patagonia, se trata de “oasis” en un medio semiárido, que los transforma en áreas con singular riqueza en biodiversidad de fauna y flora, constituyéndose en recursos escénicos que valorizan el paisaje. La conservación de estos recursos dependerá de un manejo que permita evitar su degradación, para ello es necesario conocer su composición y dinámica. Este trabajo pretende realizar un aporte en ese sentido.

REFERENCIAS

AIC. Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los río Limay, Neuquén y Negro. http://www.aic.gob.ar/sitio/home.

Bertani, Luis A. (2011) “Evaluación geoecológica de los paisajes del Departamento Minas (Provincia de Neuquén), para el estudio de la degradación de la tierra”. Universidad Nacional de La Plata. Tesis Doctoral.

Compagnucci R.H. y Araneo D.C. (2007) Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XXII.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder,D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment 113: 893-903.

Chuvieco, E. (2006): Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel, Madrid, 592 pp.

Department of the Interior U.S. Geological Survey, Landsat 8 Surface. Reflectance Code (LASRC) Product Guide, Version 2.0 .May 2019.

Department of the Interior U.S. Geological Survey, Landsat 4-7 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide, Version 2.0 .May 2019.

Hantson,S, Chuvieco, E, Pons, X, Domingo, C, Cea, C, More, G, Cristobal, J, Peces, J, Tejeiro J. (2011) "Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección" Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía. Alcalá de Henares.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. www.argentina.gob.ar/inta.

IGN. Instituto Geográfico Argentino (2019) Modelo Digital de Elevación (MDE-Ar). Recuperado: http://www.ign.gob.ar

Kruse, F.A. (2004). "Comparison of Atrem, Acorn, and Flaash atmospheric corrections using low-altitude Aviris data of Boulder, Co". Recuperado: http://ww.w.hgimaging.com/FAK_Pubs.htm

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite–1 Syposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317

Sobrino, J., RsissouniN, Z. (2001). A comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data. Remote Sensing of Environment. Elsevier Volume 75, Issue 2 Pages 256-266

VARIACIONES HIDROQUÍMICAS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS UTILIZADOS PARA ABASTECIMIENTO GANADERO EN UN SECTOR DEL PARTIDO DE GENERAL LAVALLE

Oviedo B.[a], Pasquale Pérez M.[a], Galliari M.[a,b], Borzi G.[a,c] y Carol E.[a,c]

[a]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, FCNyM Univesidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Centro de Química Inorgánica, CEQUINOR, CONICET – UNLP, ARGENTINA*
[c]*Centro de Invesrtigaciones Geológicas, CIG, CONICET – UNLP, ARGENTINA*

e-mail: bautistaoviedo@hotmail.com

RESUMEN

Gran parte del partido de General Lavalle en la provincia de Buenos Aires se desarrolla sobre un ambiente de antiguas planicies costeras donde actualmente en los sectores deprimidos se acumula el agua de la lluvia formando cañadas, las que también constituyen áreas de descarga local del agua subterránea. La presencia de suelos salinos, mal drenados y la frecuente anegabilidad del área determinan que la ganadería sea la principal actividad económica de la región, donde el agua de las cañadas y la subterránea somera son las fuentes de abastecimiento de agua del ganado. El objetivo del trabajo fue analizar las variaciones hidroquímicas en dichas fuentes de agua y determinar su aptitud para uso ganadero. Para ello, se estableció una red de monitoreo constituida por puntos de muestreo de agua superficial y subterránea determinándose in situ la conductividad eléctrica y en laboratorio la concentración de iones mayoritarios (HCO_3^-, CO_3^{-2}, Cl^-, SO_4^{-2}, NO_3^-, Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+ y K^+) mediante métodos estandarizados. Los muestreos fueron realizados en agosto y diciembre de 2019, representando el muestreo de agosto un periodo de excesos hídricos, mientras que el de diciembre de déficit hídrico. Los resultados obtenidos indican una predominancia de agua clorurada sódica tanto en las cañadas como en el agua subterránea en ambos periodos, no obstante existe un aumento en la conductividad eléctrica del agua hacia el periodo de déficit hídrico. Con relación a la calidad para uso ganadero sólo se registran limitaciones en el contenido de nitratos en alguna de las muestras subterráneas. Los resultados presentados en este trabajo, si bien son preliminares, aportarán información a un sector productivo donde la cría de ganado es la principal actividad económica de los pobladores locales.

Palabras Clave: Recursos hídricos, Calidad del agua, Ganadería extensiva.

INTRODUCCIÓN

La ganadería es una de las actividades económicas más importantes en Argentina por contar con extensas planicies dedicadas a este fin. Según los resultados del último Censo Nacional Agropecuario, realizado en el año 2018 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC, 2018), la provincia de Buenos Aires es la mayor productora ganadera del país, con aproximadamente 56 millones de cabezas de ganado, las cuales incluyen al ganado bovino, ovino, porcino, caprino y equino. En este contexto el centro – este de la provincia de Buenos Aires, y en particular el partido de General

Lavalle, ver Fig.1, dedica su territorio a la cría de ganado vacuno para engorde como principal actividad productiva.
Dicho partido se desarrolla sobre un ambiente de antiguas planicies costeras con dominancia de suelos salinos de textura franco arcillosa la cual le otorga una baja permeabilidad. Esto sumado al clima templado húmedo, donde la precipitación media anual es cercana a 1000 mm, favorece los anegamientos y encharcamientos principalmente en los meses más frios donde se concentran los excedentes hídricos (Carol et al., 2015). De esta manera, en los antiguos canales de marea de la planicie costera se forman cañadas que acumulan agua que es utilizada junto con el agua subterránea para el abastecimiento del ganado. Si bien no existen problemas de cantidad en el agua de abastecimeinto, la calidad es una limitante para algunos usos debido a que en sectores registra elevada salinidad (Carol et al., 2007). En este sentido, algunos elementos mayoritarios en el agua tales como cloruros, sulfatos, magnesio y nitratos pueden afectar en elevadas concentraciones la salud del ganado (Bavera, 2011). En base a esto, el objetivo del trabajo fue analizar las variaciones hidroquímicas de los recursos hídricos en un sector del partido de General Lavalle y determinar su aptitud para uso agropecuario.

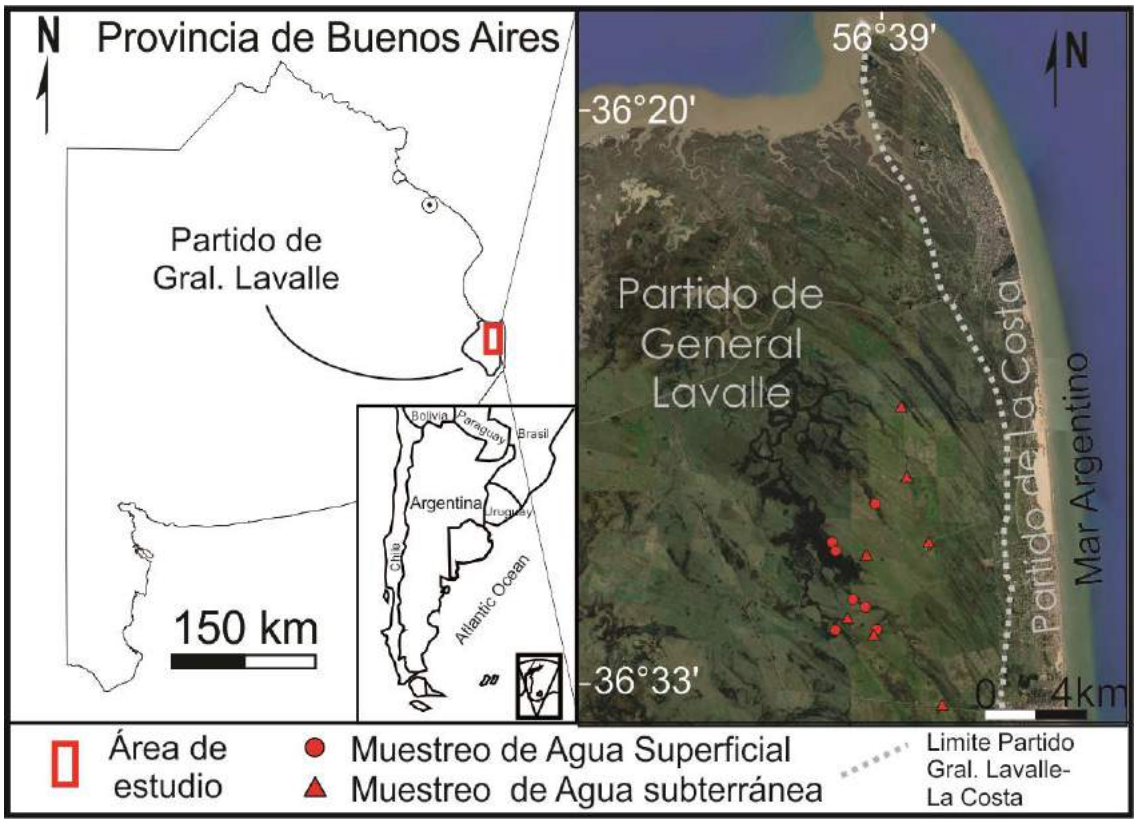


Figura 1. Área de estudio y red de muestreo.

METODOLOGÍA

Se realizó un relevamiento de cañadas y molinos someros utilizados para el abastecimiento de agua del ganado en predios localizados en el sector central del Partido de General Lavalle, ver Fig.1. La red de monitoreo generada contó con 7 puntos de muestreo de agua superficial de las cañadas y 7 puntos de muestreo de agua

subterránea procedente de molinos. Se realizaron dos muestreos, en agosto y diciembre de 2019, cubriendo un período de exceso y déficit hídrico, respectivamente. En campo se midió la conductividad eléctrica del agua mediante un equipo multiparamétrico portátil. Las muestras obtenidas fueron filtradas y analizadas en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG) donde se determinaron las concentraciones de iones mayoritarios a partir de métodos estandarizados (APHA, 1998). Carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) fueron determinados por titulación. Sodio (Na^+) y potasio (K^+) por fotometría de llama, y los sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-) por espectrofotometría UV-Visible.
El análisis de las facies de agua se efectuó a partir de la representación gráfica mediante gráfico de Piper (1944). Los datos obtenidos se valoraron en relación con los límites establecidos por el INTA para consumo vacuno (Luque, 2018) y fueron volcados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de observar la distribución areal de características que puedan condicionar el agua de consumo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de conductividad eléctrica del agua y contenidos de iones mayoritarios evidencian que existen variaciones en la química del agua asociada al periodo de muestreo. Las muestras obtenidas en el periodo de excedentes hídricos presentan conductividades eléctricas entre 1,92 y 5,43 mS/cm en el agua subterránea y entre 0,84 y 2,63 mS/cm en el agua superficial. Las facies químicas son Na-HCO_3-Cl a excepción de una muestra de agua superficial que es de tipo Na-Cl, ver Fig.2. Por su parte en el periodo de déficit hídrico se registra un aumento en los valores de la conductividad eléctrica, la que varía entre 3,1 y 9,1 mS/cm en el agua subterránea y entre 1,5 y 28,2 mS/cm en el agua superficial, ver Fig. 3. Este aumento en la salinidad es acompañado por cambio en las facies químicas el cual ocurre de manera más marcada en el agua subterránea hacia facies dominantemente Na-Cl. Sin embargo, respecto a este cambio de facies, si bien porcentualmente el Na^+ y Cl^- aumentan más en el agua subterránea, las concentraciones en estos iones se incrementan de manera más notoria en el agua superficial. Esto se debe a que en los periodos de déficit hídrico la tasa de evapotranspiración en las cañadas es alta, llegando a formarse costras salinas de halita (NaCl) en los sedimentos del borde a medida que el agua se evapora y reduce la extensión de las cañadas (Carol et al., 2015).
En relación con la calidad del agua para bebida del ganado existen elementos que presentes en grandes concentraciones pueden tener efectos tóxicos en el animal, así como también existen algunos elementos que si bien no afectan directamente a la salud reducen la palatabilidad del agua, con la consecuente reducción del consumo y disminución del rendimiento (Schlink et al., 2010). Respecto a los límites recomendados para el agua de consumo de ganado (Luque, 2018) se observa que, exceptuando tres puntos de muestreo correspondientes a aguas subterráneas, el agua es apta para consumo vacuno acorde a los elementos analizados. Las limitaciones registradas en estas muestras se relacionan a elevados contenidos de NO_3^- en dos de ellas, mientras que la otra excede el límite establecido para Mg^{2+}, ver Fig. 3.
Con respecto a los niveles sugeridos para el NO_3^-, se establece en 44 mg/L para ganado lechero, mientras que el ganado de engorde que predomina en el área de estudio puede tolerar concentraciones de hasta 100 mg/L. Los excesos en concentraciones de NO_3^- representan un riesgo para la salud animal ya que suelen reducirse a nitritos (NO_2^-), pudiendo generar al ganado metahemoglobinemia. Esto se traduce en una pérdida de la

capacidad portadora de oxigeno y la consecuente anoxia (Bavera, 2011). Los pozos que presentaron esta limitante se encuentran en las cercanías de lugares destinados a la cría de ganado o corral, donde los animales permanecen un tiempo prolongado. En este sentido, la degradación de excretas puede aportar considerables cantidades de NO_3^- (Hudak et al., 2000; Suthar et al., 2009, García et al. 2015), siendo dichos corrales la posible fuente de aporte de nitrato al acuífero. La degradación de las excretas también puede aportar en menores proporciones otros elementos tales como Cl^-, SO_4^{2-}, P, y K^+, sin embargo, nótese que en ninguno de los muestreos se registraron concentraciones por encima del límite permitido en estos iones.

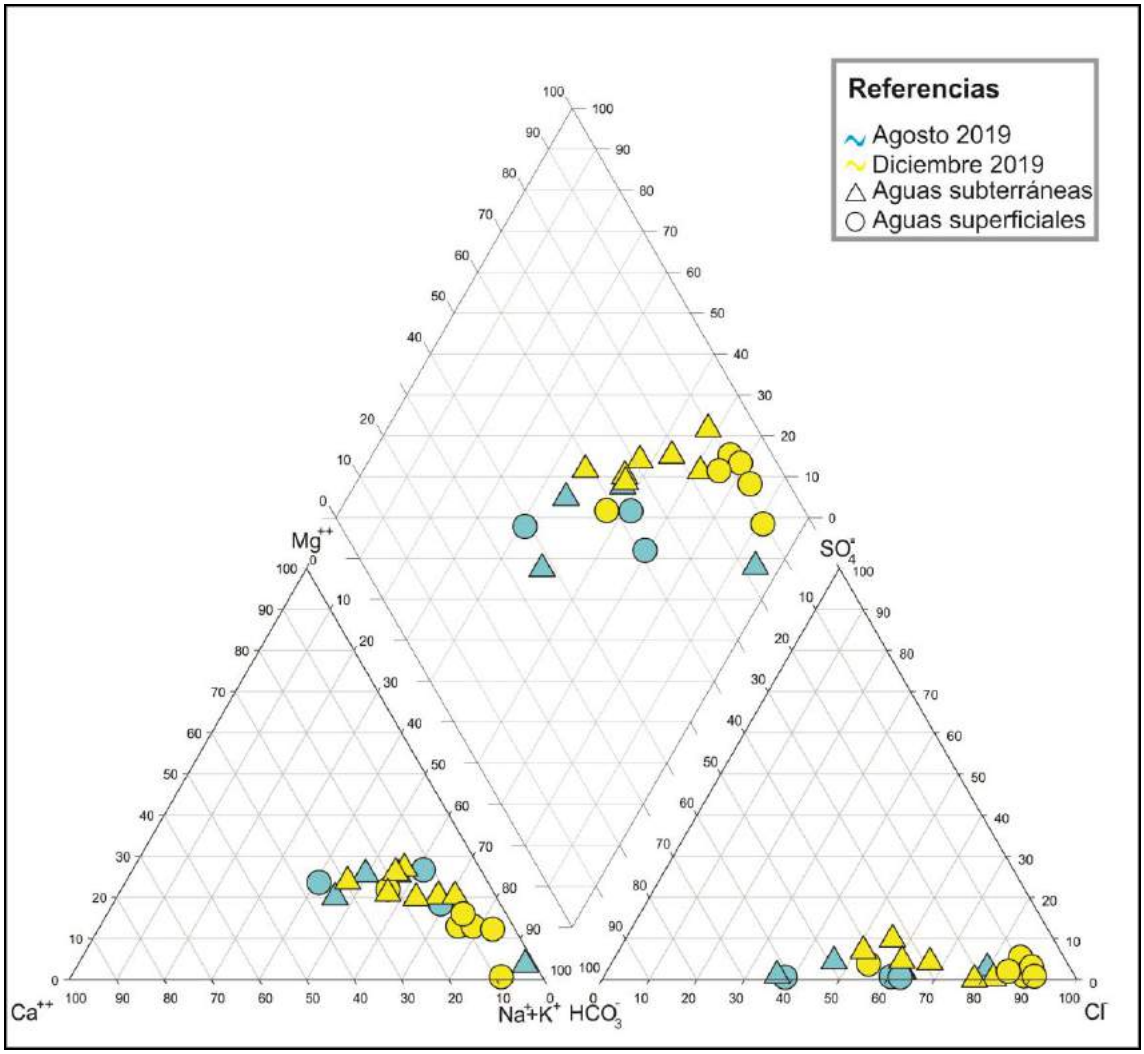


Figura 2. Diagrama Piper (1944) indicando el tipo de agua de los muestreos realizados.

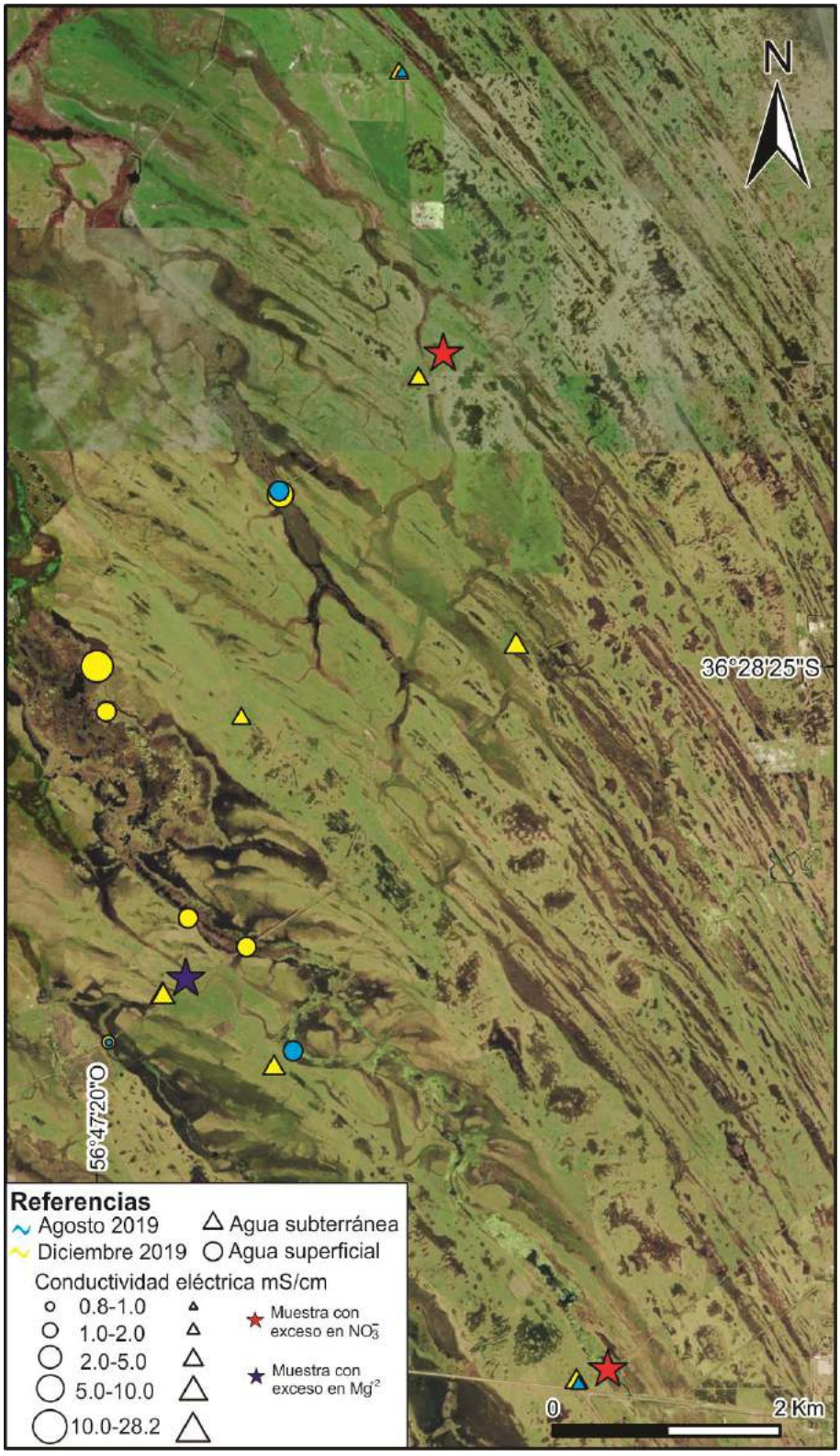


Figura 3. Variaciones espaciales de la conductividad eléctrica del agua.

Por su parte, los límites en agua de consumo ganadero para Mg^{+2} son de 250 mg/L para vacas lecheras y 300 mg/L para el resto del ganado (Luque, 2018). Tal como se mencionó anteriormente sólo una muestra correspondiente al periodo de déficit hídrico

presenta contenidos de Mg^{+2} superiores al límite definido para vacas lecheras y próxima al del ganado de engorde. Esto podría constituir un problema en el consumo de ganado debido a que esta muestra es una de las que registra tambien mayores contenidos de SO_4^{-2}. Un exceso en Mg^{+2} combinado con elevado contenido de SO_4^{-2} puede conferirle un sabor amargo al agua de consumo, y en el peor de los casos podría ocasionar diarrea y problemas en la tolerancia de ingesta, motivando así la deshidratación y aumentando el riesgo de muerte del ganado (Bavera, 2011).

Por último, es importante señalar que si bien en el área existe un predominio de agua subterránea salina (valores superiores a 2 mS/cm) esto no es un impedimento para el consumo del ganado. Los iones disueltos en el agua constituyen parte de los componentes en la dieta del ganado vacuno (Adams y Sharpe, 1995). Para el caso de los bovinos el agua de bebida aporta hasta el 20 % de calcio (Ca), el 11 % de magnesio (Mg), el 35 % de sodio (Na) y el 28 % de azufre (S) requeridos en la dieta (NAS, 1974; Pérez Carrera et al., 2007). Esto evidencia la importancia que adquieren los estudios de calidad de agua en la cría de ganado ya que la misma no sólo juega un rol importante en el estado de la salud animal, sino que también es parte de su nutrición.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que, si bien la concentración de los elementos mayoritarios y conductividad eléctrica del agua es mayor durante los meses de déficit hídrico, este incremento no afecta a la calidad del agua para consumo ganadero. A excepción de tres muestras, que superan el límite para NO_3^- o Mg^{2+}, el agua superficial y subterránea se encuentra dentro de los límites establecidos para el consumo del ganado respecto de los elementos analizados.

Los datos aportados en este trabajo aportan bases para la selección de sitios a considerar como abrevaderos, los cuales deben tener especial cuidado de no estar en cercanías de corrales. No obstante, dada la variabilidad temporal registrada, la realización de monitoreos periódicos resulta necesaria para controlar que la calidad del agua de bebida ganadera no afecte la actividad económica del área.

REFERENCIAS

Adams R.S. and Sharpe W.E. Water intake and quality for dairy cattle. *Penn State extension publication, DAS 95-8, University Park, PA* (1995).

APHA (American Public Health Association). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, *20th ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC* (1998).

Bavera, G. A. Aguas y aguadas para el ganado. *Editorial Imberti – Bavera. 4ta edición* (2011).

Carol, E., Braga, F., Da Lio, C., Kruse, E. and Tosi, L. Environmental isotopes applied to the evaluation and quantification of evaporation processes in wetlands: a case study in the Ajó Coastal Plain wetland, Argentina. *Environmental Earth Sciences 74:5839 – 5847. DOI: 10.1007/s12665-015-4601-6* (2015).

Carol, E., Kruse, E. and Pousa, J. Environmental hydrogeology of the southern sector of the Samborombon Bay wetland, Argentina. *Revista Springer* (2007).

García, A., Fleite, S., Ciapparelli, I., Pugliese, D., Weigandt, C. and De Iorio, A. Observaciones, desafíos y oportunidades en el manejo de efluentes de feedlot en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ecología austral, vol. 25, no 3, pp.255-262* (2015).

Hudak, P.F., Videan, N. and Ward, K. Nitrate and chloride concentrations in the High Plains Aquifer, Texas. *International Journal of Environmental Studies, vol. 57, no. 5, pp. 563-577* (2000).

INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). Censo Nacional Agropecuario. *INDEC, Buenos Aires, Argentina* (2018).

Luque, J. L. Calidad de agua para bebida de animales. *INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria)* (2018).

NAS (National Academy of Sciences). More water for arid lands. *NAS, Washington D.C., USA. 73-80* (1974).

Pérez Carrera A., Moscuzza C., Grassi D. and Fernández Cirelli A. Composición mineral del agua de bebida en sistemas de producción lechera en Córdoba, Argentina. *Veterinaria México, 38 (2): 153-164* (2007).

Piper, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *American Geophysical Union* (1944).

Schlink A.C., Nguyen M.L. and Viljoen G.J. Water requirements for livestock production: A global perspective. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics), 29 (3): 603-619* (2010).

Suthar, S., Bishnoi, P., Singh, S., Mutiyar, P. K., Nema, A. K. and Patil, N. S. Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, India. *Journal of hazardous materials, vol. 171, no. 1-3, pp. 189-199* (2009).

MODELACIÓN DE PROCESOS GEOQUÍMICOS EN RELACIONES AGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA EN EL ÁMBITO RURAL DE CANALS

Pascuini M.[a], Cabrera A.[b] Blarasin M.[b], Eric C.[b], Matteoda E.[b], Becher Quinodoz F.[a], Lutri V.[a,b] y Giacobone D.[a]

[a]*CONICET. Dpto. Geología. FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA*
[b] *Dpto. de Geología, UNRC, ARGENTINA*

e-mail: mpascuini@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

La composición química de un agua es resultado de la estrecha relación agua-roca o sedimentos y fase gaseosa disuelta y de mezclas de aguas. La modelación hidrogeoquímica, basada en la termodinámica, permite predecir reacciones que tienen lugar en un acuífero y que explican la composición química observada, permitiendo validar los modelos conceptuales para mejorar la comprensión del origen de la composición del agua y sus variaciones. El objetivo del trabajo es indagar sobre los procesos geoquímicos que determinan la composición del agua subterránea y la superficial relacionada en un sector mal drenado típico de la llanura pampeana cordobesa. Se emplearon metodologías hidrogeológicas convencionales y modelación numérica de tipo inversa. Los resultados obtenidos permiten definir un mosaico geoquímico dominado fundamentalmente por aguas subterráneas salobres y saladas, sulfatadas-cloruradas sódicas, resultantes de un largo tránsito y evolución en el acuífero desde el oeste provincial con sectores de flujos locales de agua influenciados por recarga de precipitaciones en médanos activos que generan, en la parte superior del acuífero, lentes de agua dulce de tipo bicarbonatadas sódicas. Estos flujos subterráneos descargan en lagunas de diverso tamaño y composición química (salobres a saladas). La modelación numérica permite validar el modelo conceptual mostrando que en flujos intermedios/regionales en el acuífero, que descargan en lagunas más grandes y saladas, predominan procesos geoquímicos de precipitación de yeso y calcita, intercambio catiónico, neoformación de illita y meteorización de silicatos, sumándose el proceso físico de evaporación que concentra sales. En cambio, en los flujos locales de aguas más dulces que descargan en cuerpos lagunares menores, predominan la disolución de yeso y halita (o concentración de Cl^- desde las lluvias), intercambio catiónico no evidenciándose concentración de sales por evaporación en el destino final debido a las mayores velocidades de flujo y menores trayectos recorridos desde la recarga.

Palabras Clave: Geoquímica, Acuífero libre, Modelo numérico

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El agua subterránea posee un rol fundamental en los estudios integrados de sistemas hidrológicos no sólo porque es la más abundante y más utilizada en numerosos sitios, participando de dimensiones económicas y sociales, sino por su rol ecológico y en diversos procesos geológicos (Vrba and Lipponen, 2007). La provincia de Córdoba, por su configuración geológica y situación climática es rica en aguas superficiales y subterráneas, sin embargo, hay una importante variabilidad espacial y temporal en la disponibilidad, reservas y calidad. Son numerosos los problemas vinculados al agua, por

los ciclos secos y húmedos que se suceden y la consecuente influencia en aspectos hidrodinámicos, por los aspectos relacionados a la composición química natural y contaminación y por la escasa planificación y complicada gestión de los recursos hídricos (Blarasin et al, 2014). La composición del agua es el resultado de la íntima relación agua, sólidos (roca, sedimentos) y fase gaseosa disuelta en la solución y de las relaciones hidráulicas entre sistemas. La construcción teórica o conceptual que engloba el conjunto de reacciones químicas que tienen lugar en un acuífero determinado permite elaborar el modelo hidrogeoquímico de un área en particular. La modelación hidrogeoquímica, que se basa en la teoría termodinámica, permite predecir cómo reaccionarán los componentes en sistemas de diferente complejidad y cuál será el estado final (de equilibrio) del sistema una vez finalizadas las reacciones. De este modo, la modelación numérica se constituye en una herramienta que permite comprender el origen de la composición del agua y la causa de sus variaciones espaciales y temporales. Sin embargo, para su aplicación, se debe tener un buen modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del área.

El objetivo principal de la investigación es elaborar el modelo geoquímico conceptual, validado con modelación numérica, que permita explicar procesos geoquímicos vinculados a relaciones entre agua superficial y subterránea en un área mal drenada de la llanura pampeana cordobesa.

Se seleccionó como área de estudio la zona rural aledaña a la localidad de Canals (Fig. 1), considerando que el entendimiento de los procesos hidrogeoquímicos permitirán aportar a la gestión ambiental.

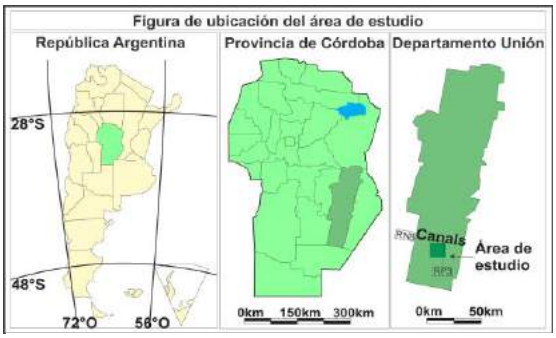


Figura 1. Ubicación del área de estudio

MÉTODOLOGÍA EMPLEADA

La investigación se realizó a escala 1:50.000, sobre la base de hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), imágenes satelitales y análisis de antecedentes (Blarasin et al., 2014). Se elaboró el mapa geológico-geomorfológico que fue chequeado en el campo con la identificación y descripción de unidades en base a las características morfológicas propias de los procesos que les dieron origen. Para la caracterización hidrometeorológica se trataron e interpretaron datos de precipitaciones de la serie Canals (1935-2018), perteneciente a la estación del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) de la localidad. Los datos de temperatura del aire, obtenidos mediante la aplicación ClimateData.org. (1982-2012), permitieron el cálculo de la evapotranspiración potencial. Se elaboraron balances hídricos edáficos modular (Thornthwaite y Mather, 1955) y seriado utilizando el software PDIWin (Ravelo y Herrero Machado, 1999) con el objeto de conocer la evapotranspiración real del área, excesos y déficit hídricos. Para el análisis geoquímico se censaron 7 cuerpos de aguas superficiales y 9 perforaciones en el ámbito rural, en las que se determinaron, in situ, profundidades del nivel freático y parámetros de calidad (temperatura, conductividad eléctrica (CE) y pH). Se tomaron muestras para el posterior análisis químico de elementos mayoritarios (alcalinidad, SO_4^{-2}, Cl^-, Na^+, K^+, Ca^{+2}, Mg^{+2}). Las determinaciones analíticas se realizaron con metodologías convencionales (APHA, 2005) en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad Nacional de Río Cuarto

(UNRC). La información resultante fue procesada, obteniéndose los mapas de potenciales hidráulicos del acuífero libre e hidrogeoquímicos de interés. Se elaboró el modelo hidrogeoquímico conceptual, el cual fue validado mediante modelación numérica con el software NETPATH (Plummer et al., 1991). Cabe aclarar que el programa elegido admite la modelación de tipo inversa y permite conocer, a partir de datos observados en una solución inicial y en una final a lo largo de una línea de flujo, las reacciones químicas que tienen lugar en el medio y que condujeron a la evolución observada, asumiendo flujo de tipo pistón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima es templado, subhúmedo-seco. La precipitación media anual es del orden de 869 mm y se concentran fundamentalmente en primavera-verano. Se observa un comportamiento cíclico, pero de tendencia central cuasi estacionaria a lo largo de las décadas analizadas. Sin embargo, realizado el balance hídrico edáfico, predominan los excesos hídricos por sobre los déficit, lo que trajo aparejado en años húmedos aumento de escurrimientos y eventualmente desborde de canales además de ascenso generalizado del nivel freático por recarga al acuífero (Fig. 2).

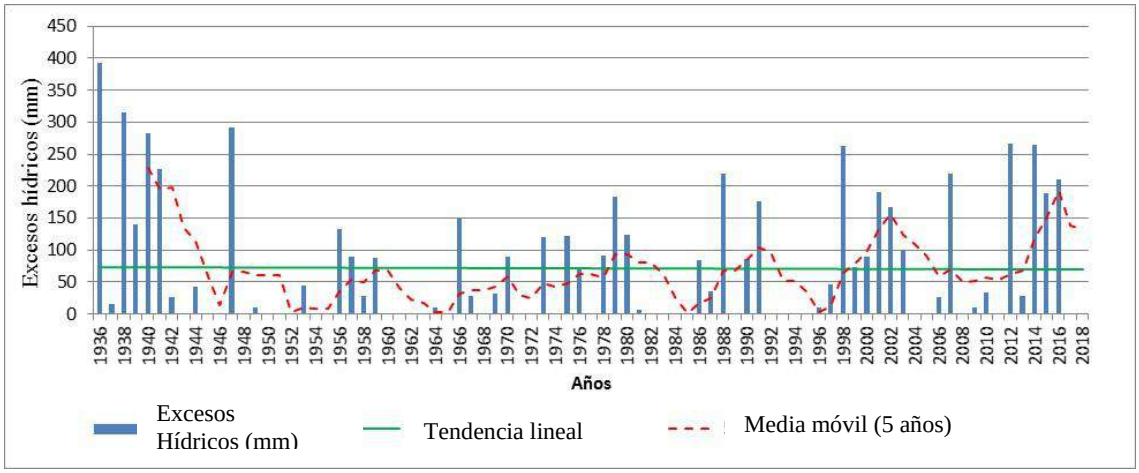


Figura 2. Curva de distribución de excesos hídricos. Serie Canals (1935-2018).

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA-GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA SUPERFICIAL

La zona se ubica sobre el bloque elevado de Viamonte, asociado a la falla regional del Saladillo. Se caracteriza por un relieve casi plano a muy suavemente ondulado, de bajas pendientes y drenaje moderadamente impedido. Dado que el área ha estado sujeta a periodos de oscilación climática, pasando de climas áridos a húmedos en forma alternante, se ha generado un mosaico de geoformas en el que se observa una paleored de drenaje muy disipada y discontinua, que constituye bajos con escasa capacidad receptora de agua, a la que se sobreimpone un paisaje dominado por formas de origen eólico, megadunas parabólicas con sus cubetas de deflación asociadas de dirección NE-SO. En las cubetas se instalan lagunas y en los alrededores se desarrollan procesos de hidrohalomorfismo (playas salinas) vinculados a la posición del nivel freático y composición química del agua subterránea, como se verá más adelante (Fig. 3). Este paisaje y las condiciones climáticas, controlan un diseño hidrográfico multicubeta típico, caracterizado por bajos topográficos de variada orientación con diseño

aproximadamente radial que funcionan como receptores de agua durante las tormentas (Fig. 4).
En la zona afloran sedimentos eólicos arenosos muy finos limosos, del Holoceno Superior que, bajo la actual condición climática, muestran edafización variada. En sectores en los que los materiales están removilizados (por procesos eólicos o aluviales locales actuales) el desarrollo de suelos es escaso a nulo. A escasa profundidad se encontraron en forma localizada capas de calcretas que se asumen de edad Pleistocena.

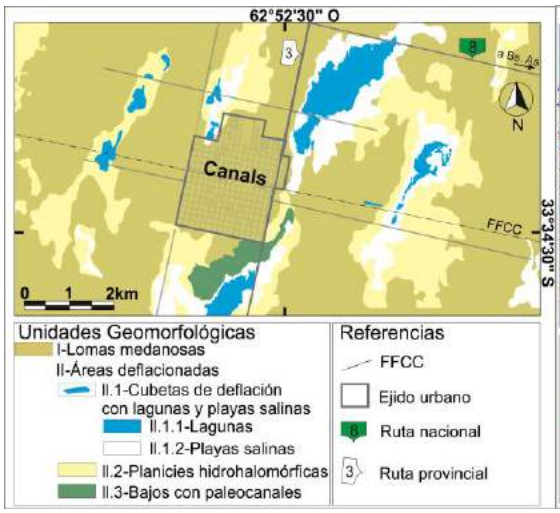


Figura 3. Mapa geomorfológico

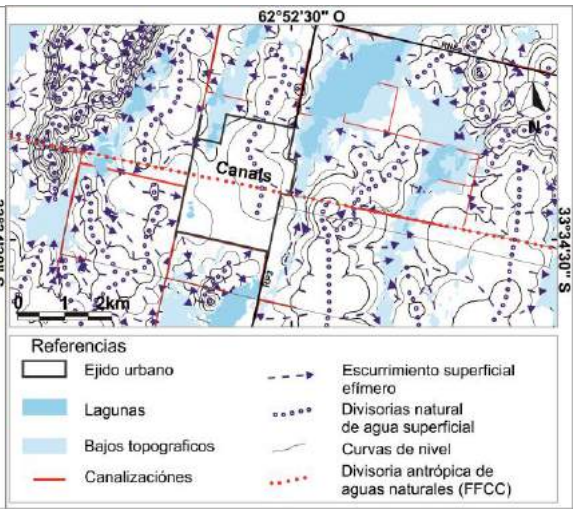


Figura 4. Red hidrográfica

HIDROGEOLOGÍA

El acuífero libre estudiado está compuesto fundamentalmente por los sedimentos eólicos arenosos muy finos limosos descriptos, y cuyas características granulométricas y estimación de parámetros hidráulicos permiten caracterizarlo como un acuífero pobre, lo que implica caudales de explotación generalmente bajos, especialmente cuando abundan las cementaciones carbonáticas.
La dinámica del agua subterránea es muy compleja. Se observa que sobre el patrón hidrodinámico regional en el que se inserta la localidad de Canals y su entorno rural, es decir un área de conducción regional/descarga parcial de agua, controlado por las características geológicas y el clima, se sobreimponen flujos de menor jerarquía como respuesta al control topográfico, en especial de dunas y cubetas (Fig. 5). Así, puede observarse que la zona de dunas al oeste de la localidad funciona como zona de recarga local, mientras que el sector este, más bajo topográficamente, funciona como zona de descarga local y regional donde el acuífero libre aporta a las lagunas permanentes. En el sector urbano, la dinámica natural del acuífero, está condicionada por las actividades antrópicas que modifican los flujos naturales ya sea generando conos de depresión por bombeo (para drenar el acuífero para la construcción de cloacas al momento del estudio) o conos de impresión (domo freático) por recarga artificial de agua importada proveniente de otro sistema (acueducto del río Tercero que aporta el agua corriente a la ciudad), vía la recarga de los sistemas de saneamiento in situ. En forma natural, esta red de flujo en la que interacciona el acuífero con el agua superficial, varía parcialmente en función de los excesos hídricos, responsables fundamentales de los cambios en la posición del nivel freático y/o cantidad de agua en cuerpos de agua superficial.

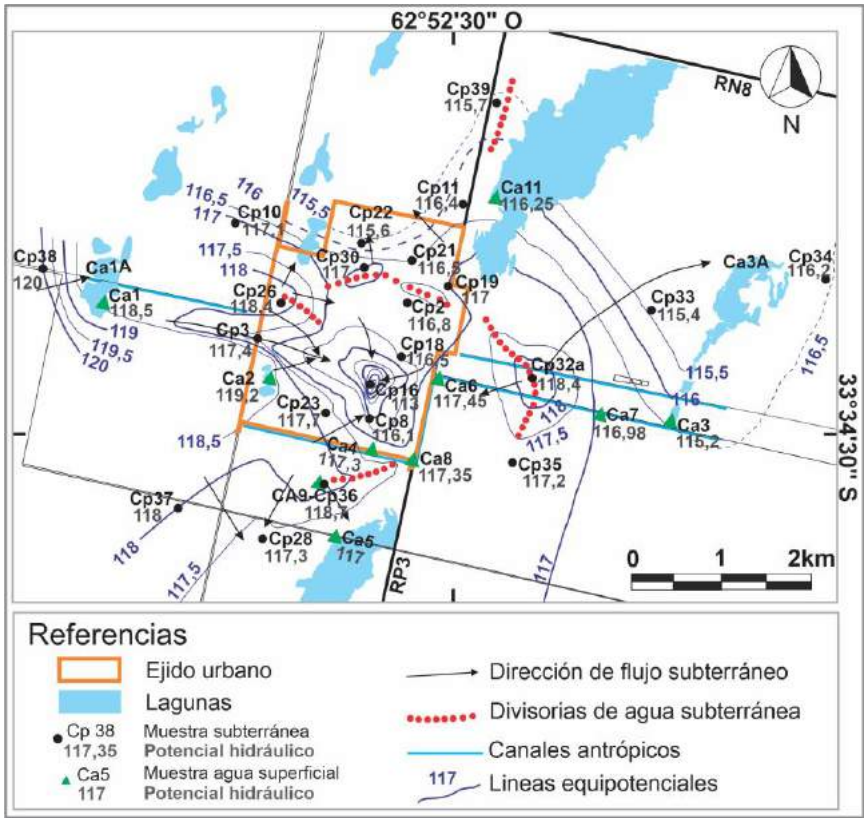


Figura 5. Mapa equipotencial. Modificado de Pascuini, 2020.

HIDROGEOQUÍMICA

El agua superficial en la zona presenta CE que varían entre 1.733 y 24.540 µS/cm, correspondiendo un 60% a aguas saladas, un 30% salobres y solo un 10% dulces, todas sulfatadas y/o cloruradas sódica (Fig. 6).

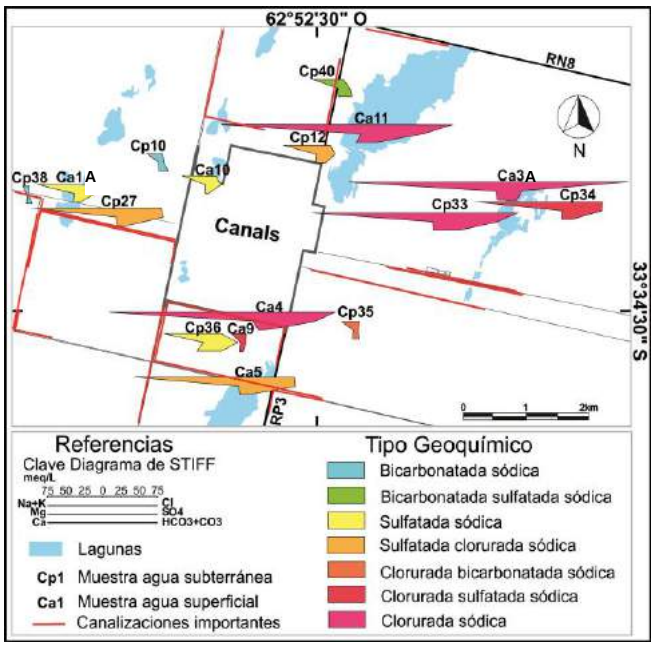


Figura 6. Clasificación geoquímica. Modificado de Pascuini, 2020.

Las aguas superficiales con menores contenidos salinos y sulfatadas sódicas se encuentran ubicadas al oeste de la ciudad de Canals (Ca9, Ca1 y Ca10) lo que puede explicarse por la presencia cercana de áreas de recarga local en lomas medanosas lo que produce la mezcla de aguas dulces de precipitaciones (Cabrera et al, 2013; Bécher y Blarasin, 2017) procedentes de recarga y las propias del acuífero (Fig. 7). Por su parte, Ca10 puede estar influenciada también por el domo freático (Fig. 5) de agua más dulce ubicado en cercanías de la zona urbana. Hacia el este de la localidad, los contenidos salinos de las lagunas aumentan considerablemente y el tipo geoquímico es

clorurado sódico. Cabe destacar que estas lagunas no reciben recarga de agua dulce local porque no se encuentran bordeadas de lomas medanosas importantes, por el contrario, se encuentran en una zona en general más plana y de menor cota (10 m por debajo del sector occidental) por lo que actúan como zonas de descarga local y, fundamentalmente, de flujos intermedios y regionales (Fig. 7). Se suma a esto el proceso de evaporación generalizado de agua superficial en la zona, aunque al ser el área más plana, hay numerosas playas salinas. El nivel freático fluctúa generando al ascender un proceso de salinización en superficie y en el perfil del suelo por procesos de evaporación y consecuente precipitación de sales. En esta situación, el agua de escurrimiento superficial en estos ambientes también lava sales que son aportadas a las lagunas. El alto contenido salino de las lagunas da como resultado típicas precipitaciones de cristales de yeso en las periferias de los cuerpos lagunares, en las playas salinas (Fig. 8).

El agua de los canales tiene conductividad eléctrica variable, aspecto fuertemente condicionado por la variabilidad del aporte de aguas pluviales del ámbito urbano o del acuífero.

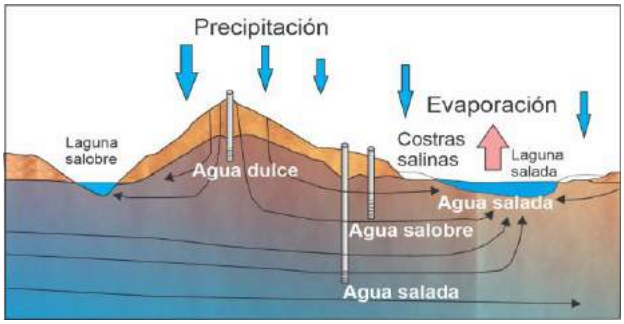


Figura 7. Esquema del funcionamiento hidrológico en la región.



Figura 8. a. Playa salina alrededor de lagunas. **b.** Rosetas de yeso precipitadas en la playa salina.

En el agua subterránea las conductividades eléctricas varían entre 846 y 15.730 µS/cm. El 66,7% son saladas o salobres y solo el 33,3% son dulces. En cuanto a la clasificación geoquímica (Custodio, 1993) se observa una mayor variabilidad en el agua del acuífero respecto a las superficiales. Si bien todas las muestras resultaron de tipo sódicas, se destacan varios tipos aniónicos mixtos (Fig. 6): bicarbonatada (22,5%), bicarbonatada-sulfatada (11%), sulfatada (11%), sulfatadas-cloruradas (22,5%), cloruradas-bicarbonatadas (11%), cloruradas-sulfatadas (11%) y cloruradas (11%). El alto contenido salino del agua subterránea de la zona es el resultado de la posición del área en el marco hidrogeoquímico regional explicado. Así, la zona de estudio, es receptora de flujos regionales, cuya evolución geoquímica natural se ha producido por la circulación a lo largo de grandes distancias y tiempos prolongados, interactuando con el medio sólido, incorporando sales por diversos procesos químicos (disolución, hidrólisis, intercambio catiónico, aporte atmosférico, etc.). El sector oriental presenta los mayores contenidos salinos naturales, aspecto asociado a que es el área más baja de la zona de estudio con zonas de descarga del flujo regional, con el nivel freático aflorante (lagunas,

playas salinas) o muy somero, en donde además el agua está sometida a procesos de evaporación que concentran y precipitan sales. Por el contrario, en la zona oeste, aparece un sector de agua dulce, bicarbonatada sódica, que se asume como una lente de agua de recarga preferencial de precipitaciones asociada a la loma constituida por la coalescencia de brazos de dunas (recarga local). Esta lente queda sobreimpuesta al acuífero de características salobre/salada, como se observa en el entorno típico de esta zona, debido a la menor densidad del agua dulce.

MODELACIÓN GEOQUÍMICA

La modelación geoquímica de tipo inversa aplicada permite predecir las reacciones químicas que tienen lugar en el medio y que condujeron a la evolución observada desde una solución inicial a una final en el sentido de flujo, mediante cálculos termodinámicos de balance de masa. Con el fin de validar el modelo geoquímico conceptual elaborado, se consideraron dos escenarios de simulación diferentes: por un lado, un modelo para el sector occidental de manera de comprobar los procesos actuantes en flujos locales que descargan en pequeñas lagunas al pie de las dunas y, por otro, se consideró un modelo para simular la descarga de flujos regionales a los cuerpos lagunares mayores.

A) Flujos locales: Se consideró la evolución geoquímica dada desde el área de recarga local en el sector de dunas (Cp38) hasta la descarga en la pequeña laguna al pie del médano (Ca1A) (Tabla I). En la simulación se consideraron las siguientes restricciones (constraints) o compuestos químicos: $CO_3^{=}$ - HCO_3^- (alcalinidad), SO_4^{-2}, Cl^-, Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+, K^+. Las fases seleccionadas con las cuales reacciona el agua, en función de la mineralogía típica de los sedimentos de la zona, fueron **calcita** (por la gran cantidad de calcretas presentes), **CO_2 gas**, disuelto en el agua y responsable principal de su agresividad (por tratarse de un acuífero libre), **yeso** (SO_4Ca, fundamentalmente para simular aporte de lluvias, especialmente en esta zona donde los vientos aportan partículas de yeso de voladuras desde las áreas salinas), **halita** (ClNa, también con el fin de simular la fuente de Cl^- por aporte de precipitaciones (Edmunds, 1996; Cabrera, 2009) y además por su existencia como sales dispersas que pueden ser transportadas por el viento y lavadas por el agua de lluvia), reacciones de **intercambio catiónico** calcio/sodio (típico en este tipo de sedimentos finos con alta proporción de arcillas (illitas), **illita (**fracción de arcillas dominante en los sedimentos presentes) y, **feldespato potásico, albita** y **anortita** (minerales reactivos más comunes en el loess). Se consideró además al proceso de evaporación.

Tabla I. Análisis químicos de las muestras consideradas

Muestra	pH	CE [µS/cm]	Alcalinidad [mg/L]	SO_4^{-2} [mg/L]	Cl^- [mg/L]	Na^+ [mg/L]	K^+ [mg/L]	Ca^{+2} [mg/L]	Mg^{+2} [mg/L]
Cp38	7,31	846	347,8	38,5	60	145,6	15,1	17,6	8,3
Ca1A	8,78	4000	423,8	1280,9	571,4	1087,0	62,4	33,6	14,6

Los modelos obtenidos (Tabla II) consideran **disolución de yeso** (posible dado que Cp38 está subsaturada en esta fase, IS = -2,6) y **halita** (o concentración de estos aniones por la recarga de las lluvias), **intercambio catiónico,** y en muy

 ISBN 978-987-1323-66-1

bajo grado **hidrólisis de silicatos** (feldespatos, anortita o albita, y de illita).

B) Flujos intermedios/regionales: Se consideró la línea evolutiva de flujo, que va desde la muestra Cp33 a Ca3A (simulación 2) (Figs. 5 y 6, Tabla III). Se consideraron para el análisis las mismas variables químicas y fases que en la simulación 1, a excepción de halita. Cabe aclarar que la misma no fue considerada con el fin de que el modelo calcule las tasas de evaporación usando al cloruro como ion conservativo.

Tabla II. Modelos obtenidos- simulación 1.

	Modelo 1	Modelo 2
Calcita	---	---
Yeso	12,5	12,5
Halita	13,9	13,9
Intercambio catiónico	12,7	12,1
CO_2 gas	---	---
Albita	---	1,2
Anortita	0,6	---
Feldespato K	0,6	0,6
Illita	1,0	1,0
Factor de Evaporación	1,0	1,0

Tabla III. Análisis químicos de las muestras consideradas

Muestra	pH	CE [µS/cm]	Alcalinidad [mg/L]	SO_4^{-2} [mg/L]	Cl^- [mg/L]	Na^+ [mg/L]	K^+ [mg/L]	Ca^{+2} [mg/L]	Mg^{+2} [mg/L]
Cp33	6,58	15730	1342,9	3532,1	3642,9	3918,1	417,6	274,4	170,7
Ca3A	8,83	24540	1156,6	1602,9	6429,6	4701,7	48,4	16,0	24,4

Los modelos obtenidos (Tabla IV) consideran:

a) **Precipitación de yeso:** coherente con la disminución de la concentración de sulfatos y calcio y del grado de saturación entre la muestra inicial (Cp33: IS= -0,4) y la final (Ca3A: IS= -1,9). Además, coincidente con las evidencias observadas en el campo sobre la precipitación de yeso, incluso en los perfiles de suelo (Fig. 8) en estos sectores.

b) **Precipitación de calcita:** coincidente también con la disminución de la alcalinidad y de Ca^{+2} entre las muestras inicial y final. Además, porque la muestra inicial posee un valor de IS (-0,06), tan cercano a cero que habitualmente se considera en equilibrio químico de saturación, pudiendo por lo tanto precipitar ante un pequeño aumento en su concentración aportado por otra fuente. Cabe destacar que el aumento del grado de saturación hacia la muestra final (Ca3A: IS= 0,9) podría deberse también a la convergencia de procesos que aportan calcio y carbonato al agua.

c) **Intercambio catiónico:** en el cual se retendría sodio y liberaría calcio.

d) **Neoformación de illita y** en bajo grado **meteorización de feldespato K, albita y/o anortita**.

e) Se destaca, además, al proceso de evaporación (en un factor de 1,8) que permitiría la concentración de sales en los cuerpos lagunares.

Tabla IV. Modelos obtenidos- simulación 2.

	Modelo 1	Modelo 2
Calcita	-22,5	-22,5
Yeso	-27,7	-27,7
Intercambio catiónico	-43,4	-27,6
CO_2 gas	---	---
Albita	31,6	---
Anortita	---	15,8
Feldespato K	5,6	5,6
Illita	-26,2	-26,2
Factor de evaporación	1,8	1,8

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio permitieron definir y confirmar un mosaico geoquímico dominado por aguas subterráneas y superficiales predominantemente salobres y saladas, principalmente sulfatadas-cloruradas sódicas, resultantes de un largo tránsito y evolución en el acuífero desde el oeste provincial. Las lagunas más importantes muestran la misma composición química que el acuífero exponiendo su estrecha

relación y origen, aunque en ellas se observa aumento salino por los evidentes procesos de evaporación desde la superficie libre de agua. Las modificaciones específicas en el patrón natural del acuífero que, en general de oeste a este, muestra aguas que pasan de más dulces (846 µS/cm) a más saladas (15.730 µS/cm), están condicionadas por los aspectos hidrodinámicos locales. Así, y como resultado de los flujos locales explicados, se produce una influencia sobre la composición química, observándose en la parte superior del acuífero lentes de agua dulce/salobre de tipo bicarbonatada o sulfatada sódica, relacionadas a la incorporación de agua de recarga natural local de agua de precipitaciones en lomas medanosas o por la presencia de barreras litológicas (calcretas) que impiden la mezcla con las aguas salobres/saladas del acuífero.

Desde la perspectiva de los procesos hidrogeoquímicos actuantes el hecho de que dominen los aniones SO_4^{-2} y Cl^- en el agua superficial y subterránea está relacionado al alto producto de solubilidad (Kps) de las sales de estos aniones, que permite que estos compuestos se mantengan en solución en grandes cantidades. Mientras que cloruro muestra estabilidad en solución alcanzando valores disueltos de 3.643 mg/L, la gran concentración en sulfatos (hasta 3.532 mg/L) y el Kps menor a Cl^-, produce la notoria precipitación de cristales de $SO_4Ca.\ 2H_2O$ (yeso) en las playas salinas, tanto en el perfil de suelo como en superficie. Los cationes Ca^{+2} y Na^+ son muy variables pudiendo estar fuertemente influenciados por diversos procesos geoquímicos que los incorporan a la solución o los sacan de ella (intercambio catiónico, precipitación de yeso y calcita, hidrólisis de silicatos). Todos estos aspectos revelan, tal lo planteado en las hipótesis, que las modificaciones locales de la dinámica y de la composición química tienen una fuerte influencia morfolitológica. Finalmente, la modelación numérica permite validar el modelo conceptual elaborado, mostrando que en las lagunas más importantes de la zona y asociado a los flujos regionales predominan los procesos geoquímicos de precipitación de yeso y calcita, intercambio catiónico y estarían subordinados los de neoformación de illita y meteorización de silicatos, aunque se destaca en lagunas mayores el proceso físico de evaporación que concentra sales en los cuerpos lagunares. En cambio, en los cuerpos lagunares menores asociados a los flujos locales predominan los procesos de disolución de yeso y halita (o concentración de Cl^- desde las lluvias), a los que se suma el intercambio catiónico y, en menor grado, hidrólisis de silicatos (feldespatos, anortita o albita, y de illita). Cabe destacar que, si bien es esperable que el proceso de evaporación actúe en todos los cuerpos lagunares, en los de mayor tamaño, que suelen ser más planos y menos profundos y que, fundamentalmente, poseen agua de alta salinidad, el efecto de la radiación solar al evaporar el agua favorece que se alcance más pronto los valores de los productos de solubilidad de las sales, aún las más solubles, lo que lo que permite la precipitación de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue subsidiado por los proyectos de investigación: PICT 474 del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y PPI-UNRC. Se agradece muy especialmente a la Municipalidad de Canals y a la gente local que permitió tan gentilmente el acceso a sus propiedades para la toma de muestras.

REFERENCIAS

APHA, AWWA and WPCF. American Public Health Association & Eaton, Andrew D & Water Environment Federation & American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater: 21st, Washington, D.C. (2005).

Becher Quinodoz, F., y Blarasin, M. Evaluación de relaciones geomorfología – calidad de agua subterránea mediante técnicas estadísticas y modelación numérica en la planicie arenosa del sur de Córdoba, Argentina. *Geoacta*. Vol. 41 Tomo 2 (1-17) (2017).

Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. Río Cuarto: UniRío Editora. http://www.unirioeditora.com.ar/wp-content/uploads/2020/02/978-987-688-091-6.pdf. (2014).

Cabrera, A. Evolución hidrogeoquímica e isótopos ambientales del sistema acuífero asociado a los ambientes morfotectónicos de la falla regional Tigre Muerto. Córdoba. Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 372 p., Río Cuarto (2009).

Cabrera, A., M. Blarasin, C. Dapeña y L. Maldonado. Composición físico-química e isotópica de precipitaciones del Sur de Córdoba. Estación Río Cuarto-Red Nacional de Colectores. Argentina. En "Agua Subterránea Recurso Estratégico". Edulp. Tomo 2. Pp. 35-42. (2013).

Custodio, E. Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Bocanegra y Rapaccini (Eds.). Mar del Plata. Pp. 61-78 (1993).

Edmunds, W. Indicators in the groundwater environment of rapid environmental change. En Geoindicators, Assessing rapid environmental changes in earth systems. 135-150. Editorial (1996).

Pascuini, M. Caracterización ambiental de aguas superficiales y subterráneas mediante indicadores hidrodinámicos e hidroquímicos en el ámbito urbano y periferia rural de la localidad de Canals. Tesis de grado. UNRC. Inédito (2020).

Plummer, L., Prestemon, E., y Parkhurst, D. An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flor path. US Geological Survey. Water-resources Investigations Report 91-4078. Reston, Virginia. 1-277 (1991).

Ravelo y Herrero Machado, PDIWIN 1.0, Software para Balance hídrico seriado

Thornthwaite, C. and Mather, J., The water balance. Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology VIII (1):104 pp. New Yersey (1955).

Vrba, J., and Lipponen, A. Groundwater sustainability indicators. IHP -Series on Groundwater. No. 14. UNESCO (2007).

MODELADO ANÁLOGO DE PLIEGUES POR PROPAGACIÓN DE FALLA: OBTENCIÓN Y COMPARACIÓN DEL CAMPO CINEMÁTICO

Plotek B.[a], Guzmán C.[a] y Cristallini E.[b]

[a] *Laboratorio de Modelado Geológico, Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber, UBA-CONICET, ARGENTINA.*
[b] *LA.TE. ANDES S.A. – CONICET, ARGENTINA.*

e-mail: bereplotek@gmail.com

RESUMEN

Los pliegues por propagación de falla se forman contemporáneamente a la propagación de una falla a través de una serie de estratos, donde el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación. Una de las principales características de este tipo particular de plegamiento es que su limbo frontal presenta mayor ángulo de inclinación. Los primeros métodos para analizar la evolución se basan en construcciones a partir de relaciones geométricas. Erslev (1991) propone un método cinemático, denominado Trishear, debido a que estas estructuras presentan una zona triangular de deformación penetrativa focalizada. Esto puede ser modelado por medio de cizalla conformando un modelo alternativo donde los bancos rotan progresivamente y con heterogeneidad en la deformación, sobre todo hacia el limbo frontal (Allmendinger R.W., 1998). De esta manera, se relaciona la geometría y el desplazamiento de la falla con la forma del anticlinal. Este método es especialmente útil ya que permite obtener los patrones de deformación. Sin embargo, su punto débil es que las distribuciones de velocidad pueden no tener validez mecánica, ya que no toma en cuenta las propiedades de los materiales que sufren deformación. Durante este trabajo se describe un modelo experimental realizado en el laboratorio a partir de materiales simples para la obtención del campo cinemático a lo largo del desarrollo de la estructura a partir de imágenes seriadas. El propósito consiste en definir las diferentes etapas de formación del anticlinal y plantear cómo evoluciona el campo cinemático, representado por los vectores de velocidad que se observan en las fotografías, sin dejar de lado el marco mecánico.

Palabras Clave: Modelo Análogo, Pliegues, Propagación de falla, Trishear.

INTRODUCCIÓN

Los pliegues de propagación de falla se forman contemporáneamente a la propagación de una falla a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación. El artículo de Suppe J. y Medwedeff D.A., 1990 fue el primero en presentar estudios detallados de estas estructuras, introduciendo dos modelos geométricos. El primero de estos modelos se basa en la conservación del espesor y el área de los bancos mientras que el segundo permite cambios de espesor hacia el sector del limbo frontal. Una de las principales características de este tipo particular de plegamientos es que la estructura resultante es asimétrica y el limbo frontal se caracteriza por su mayor ángulo de inclinación (Shaw et al, 2005; Brandes C. y Tanner D.C., 2014)" ver Fig.1". En este mecanismo, la falla y el

plegamiento son contemporáneos (Suppe J. y Medwedeff D.A., 1990; Saffar M. Al., 1993).

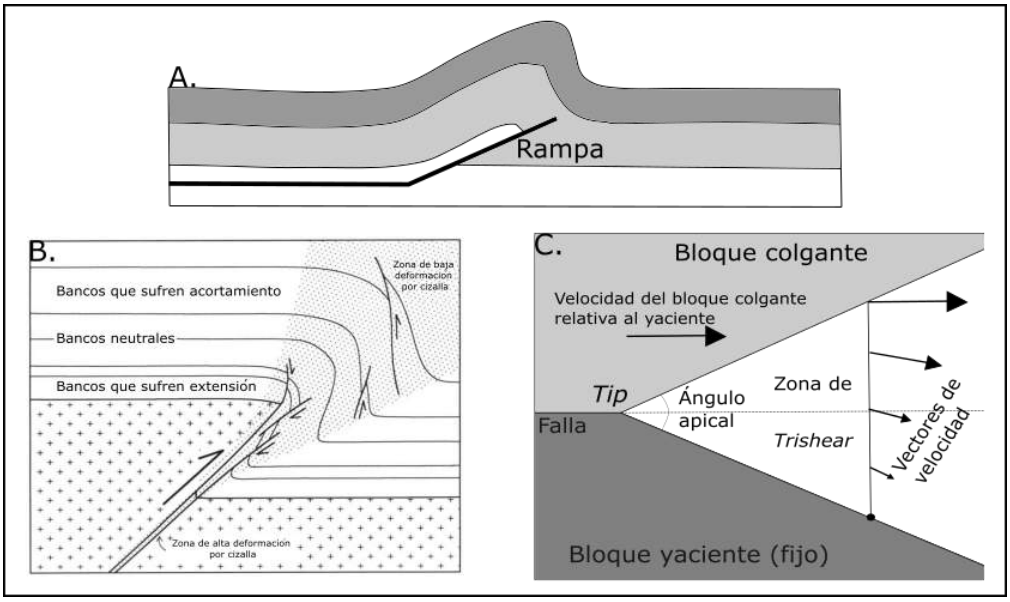


Figura 1. a. Esquema de un pliegue por propagación de falla mostrando su rampa asociada (Modificado de Jamison W.R., 1987). **b.** Modelo conceptual de la zona de cizalla triangular para pliegues de propagación de falla con participación de basamento, mostrando el *strain* que sufren los bancos involucrados. (Modificado de Erslev E. y Rogers J.L., 1993). **c.** Geometría de la zona de cizalla triangular (Modificado de Allmendinger R.W., 1998).

Esta estructura comúnmente presenta un sinclinal en la base del bloque yacente y cambios tanto de espesor como de inclinación de los estratos en el limbo frontal. Estos rasgos no pueden ser explicados por medio de los modelos de bandas *kink* mencionados anteriormente (Suppe J. y Medwedeff D.A., 1990; Saffar M. Al., 1993). Debido a esto, un nuevo modelo, esta vez basado en la cinemática, fue desarrollado y denominado *Trishear* (Erslev E., 1991). Los pliegues estudiados presentan una zona triangular de deformación penetrativa, especialmente focalizada en el extremo superior de la falla o *tip* "ver Fig.1". Esto puede ser modelado por medio de cizalla ofreciendo un método alternativo a los ya existentes. Mientras que los modelos que involucran migración de superficies axiales predicen valores de inclinación uniformes y deformación homogénea a lo largo de todo el sector frontal, los casos reales muestran grandes variaciones en estas características. Se observa en general que los estratos rotan progresivamente y que existe heterogeneidad en la deformación (Erslev E., 1991, Allmendinger R.W., 1998).

Ya que los modelos cinemáticos no pueden replicar los detalles de la deformación, la técnica del modelado análogo se utiliza para complementar los datos ya que permite incorporar un marco mecánico al método cinemático. En esta investigación, el modelado análogo es usado para estudiar el campo cinemático al que se encuentran sometidas las partículas que componen diversos materiales durante la generación de un anticlinal por propagación de falla. Se realiza con el programa PIVlab–MATLAB (Thielicke W. y Stamhuis E.J., 2014) el análisis para obtener el campo de velocidad representado por vectores. Las siglas PIV hacen referencia a un velocimetría por imagen

de partículas. Por lo tanto, lo que se obtiene es un campo instantáneo de velocidades en un plano del modelo análogo.

Metodología

Se utiliza una caja de 50 cm de largo por 15 cm de ancho y 20 cm de alto, con paredes de acrílico cuyo lateral está compuesto por un pistón móvil sujeto a un motor que permite el movimiento de este comprimiendo los materiales dispuestos en el interior. Se utiliza una lámina de plástico de alto impacto, rígida, para replicar la falla principal de 14 cm, ubicada a 23 cm del pistón móvil con un ángulo de 45 grados recreando una falla inversa. A su vez, para evitar que la placa se deslice por la arena y suba durante la compresión, se agregan unos tapones del mismo material a un lado para aumentar el rozamiento con los granos y que resulte más difícil el deslizamiento “ver Fig. 2”. Este lado se coloca de manera tal que corresponda con el bloque yaciente de la falla. Se la sujeta con cinta a los costados de la caja mientras se rellena la base con arena fina masiva hasta alcanzar 10 cm de altura y posteriormente se remueve cuidadosamente la cinta.

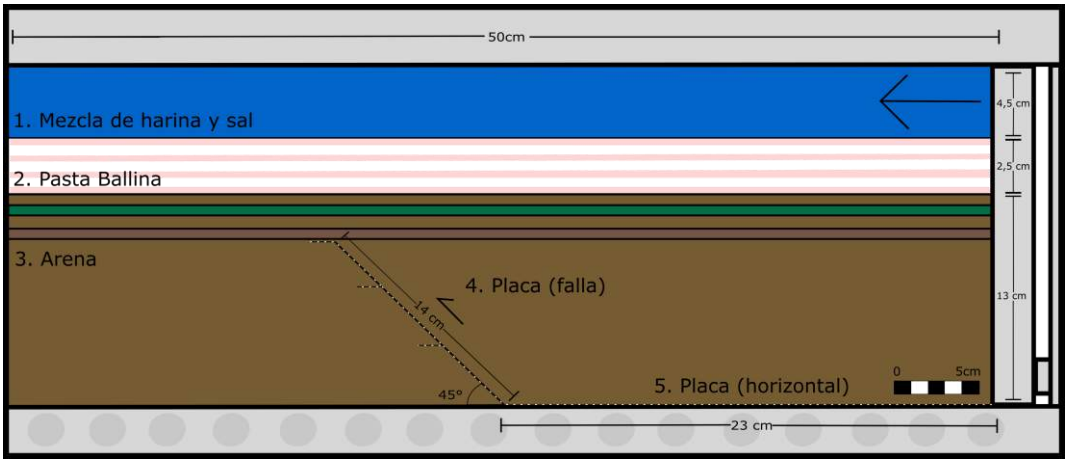


Figura 2. Esquema del experimento señalando los materiales utilizados. 1: Mezcla de sal y harina coloreada. 2: Pasta azucarada. 3: Arena. 4: Placa de alto impacto de 14 cm de largo que actúa como falla principal; en el lado externo posee pequeños picos del mismo material para evitar su deslizamiento. Se encuentra ubicada en contacto con una placa horizontal. 5. Placa de alto impacto de 23 cm de largo, ubicada en la base del modelo y fijada al pistón móvil. La flecha negra en el margen superior izquierdo indica el sentido del movimiento del pistón móvil.

Para poder visualizar la deformación que sufre la arena, se sedimentan en forma homogénea 4 capas de arena coloreada, conformando láminas hasta alcanzar 3 cm de altura. Finalizado este armado, se humedece ligeramente con agua todo el modelo para eliminar restos de aire que pueden quedar atrapados entre los granos. Luego, se permite que seque para no mojar la pasta azucarada y recuperar el valor de cohesión interna que caracteriza a la arena, que debe permanecer bajo para garantizar el escalado del modelo. Para simular los estratos que constituyen el plegamiento se utilizan láminas de pasta azucarada blanca y rosa alternadas de 50 cm de largo, hasta alcanzar los 2,5 cm de altura total. Por arriba de estas capas, se coloca un film transparente para protegerlas de

la humedad que desprende la masa de sal y harina colocada en la parte superior. Dicha masa se usa para comprimir todo el modelo, recreando la carga litósfera. Se sitúan en total 4,5 cm de mezcla. La caja se cierra a presión, pero a medida que la misma aumente, se abrirán levemente los mismos para evitar la flexión y/o quiebre del pistón móvil "ver Fig.2". Al modelo se lo comprime durante 80 minutos y se obtuvo un acortamiento total de 12 cm (24% de acortamiento). La velocidad del motor era de 1 cm cada 7 minutos. A medida que la estructura es conformada, se toman fotografías en ambos laterales para poder seguir la evolución del pliegue. Se obtuvieron en total 80 imágenes, 1 por minuto. Dichas fotografías fueron posteriormente procesadas mediante la utilización del software Irfanview^{TM} para eliminar zonas no deseadas y luego analizadas con el programa PIVlab–MATLAB (Thielicke W.y Stamhuis E.J., 2014) para obtener los vectores cinemáticos que indican el campo de velocidades.

Velocimetría por Imagen de Partículas

La técnica PIV consta de cuatro partes principales: 1. La obtención de las imágenes; 2. Pre-procesamiento y mejora de las imágenes; 3. Aplicación de un algoritmo de correlación cruzada sobre imágenes consecutivas y 4. Post-procesamiento que permite la interpretación de resultados (Termini D. y Di Leonardo A., 2018) "ver Fig.3". Opera a partir del seguimiento de la textura, es decir, la variación espacial del brillo dentro de una imagen, a través de una serie de imágenes. La imagen inicial se divide en una grilla de parches de prueba. Cada parche de prueba posee unas coordenadas de ubicación tanto para el eje X como para el eje Y en la imagen 1 a un tiempo igual a t_1 "ver Fig.3".

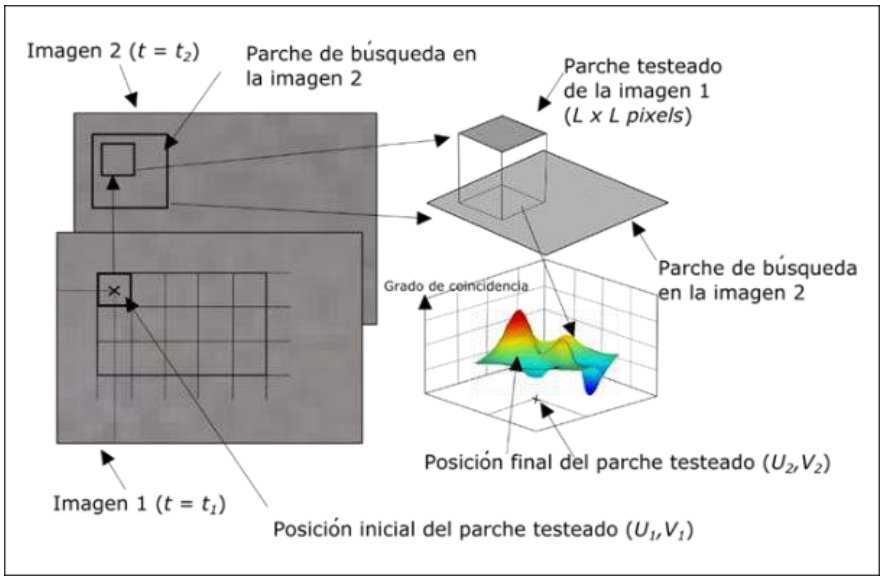


Figura 3. Principios de la técnica PIV (Modificado de White D.J. y Take W.A., 2002).

Para encontrar la nueva ubicación de este parche en una imagen posterior, se realiza una operación donde se evalúa la correlación entre el parche de prueba extraído de la imagen 1 y un parche de mayores dimensiones definido en la misma parte de la imagen 2, con un tiempo igual a t_2. La ubicación en la que se encuentra la correlación más alta

indica la posición desplazada del parche (White D.J. y Take W.A., 2002). Esta operación se repite para toda la grilla de parches dentro de la imagen, luego el ciclo es repetido para cada imagen dentro de la serie, para obtener trayectorias completas. A partir de cada fotografía, como se mencionó anteriormente, se realiza con el programa PIVlab – MATLAB (Thielicke W.y Stamhuis E.J., 2014) el análisis para obtener el campo de vectores. Este programa para poder conformar los vectores crea, dentro de la serie de imágenes, áreas que son definidas por el usuario al introducir un valor determinado de *pixels* para ser analizados. En este caso puntual las áreas de interrogación son de 96, 64 y 32 *pixels*. Luego del procesamiento se obtienen como resultado los vectores que indican dirección, sentido y magnitud del movimiento. A partir de los gráficos obtenidos es posible analizar el movimiento a lo largo de la conformación de la estructura e inferir los cambios del campo de velocidades.

Escalado del modelo

La teoría del escalado permitió comparar cuantitativamente experimentos analógicos y prototipos naturales. Esta teoría exige similitud geométrica, cinemática y dinámica, lo que permite escalar los resultados del modelo (Hubbert M., 1937). En este trabajo, nos enfocamos en los diferentes dominios del campo cinemático durante la evolución de un pliegue de propagación de falla en lugar de los valores absolutos de los vectores de velocidad. El modelo descrito fue escalado de tal manera que 1 cm en el experimento simula 100 m en un prototipo natural (factor de escala geométrico $\lambda = 1x10^{-4}$). Tanto el prototipo natural como el modelo están sujetos al mismo valor de aceleración gravitacional y en consecuencia a la misma fuerza gravitacional, imponiendo un factor de escala g = 1. Se decidió utilizar la densidad media de la corteza continental como densidad para el prototipo natural, que se estimó en alrededor de 2,60 g / cm^3 (Saha et al. 2016; Rosas et al. 2017). La densidad del modelo es el promedio entre las densidades de los materiales utilizados, 1,40 g / cm^3. De esta forma, el valor del radio de densidad (δ) es igual a 0,54. El factor de escala de tensión S es igual a 5,4 x 10^{-5}"ver Ec. (1)":

Ec. (1) $$S = \delta.g.\lambda = 5{,}4 \times 10^{-5}$$

Suponiendo un comportamiento de Coulomb frágil para las rocas del basamento, la arena es apropiada para trabajar a la escala seleccionada. En este caso la arena, con una cohesión en el rango de 1000 Pa, podría representar materiales de prototipos que se aproximan a los 20 MPa. La plastilina o materiales de modelado similares son aproximaciones útiles a las rocas en simulaciones (McClay K.R., 1976, Zulauf J. y Zulauf G., 2004, Fan et al. 2020). El comportamiento de la pasta azucarada es como la plastilina, solo comienza a fluir a altas temperaturas. Suponiendo un comportamiento dúctil de la cubierta sedimentaria, este material es conveniente para realizar el experimento análogo. La viscosidad de este material es $\sim 2{,}2 \times 10^7$ Pa s y podría representar una capa cortical dúctil con una viscosidad $\sim 10^{21}$ Pa s (Shinevar et al. 2018)

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos. Las imágenes muestran los vectores que reflejan el campo cinemático al que se encuentran sometidas las partículas

durante la configuración del pliegue. La figura 4 ilustra la componente total del vector velocidad para 6 estadios en la evolución del modelo. Cada panel muestra tanto la magnitud de la velocidad, representada con una escala de colores, y los vectores propiamente dichos. No serán descriptos los vectores que reflejan el movimiento en el sector de la mezcla de harina y sal ya que su propósito es exclusivamente aportar presión para simular una carga litoestática.

En los primeros minutos, las partículas migran en el sentido impuesto por el pistón móvil. Los vectores se encuentran representados exclusivamente por la componente horizontal de la velocidad, Vx, y pierden magnitud hacia el lado correspondiente al bloque yaciente de la falla principal. El sector central del modelo concentra las mayores magnitudes y se delimita la zona de rotación progresiva (ZRP). Las partículas son empujadas por el pistón, migrando hacia delante con un dominio marcado de la componente horizontal Vx hasta que aparece la componente vertical Vy, en el inicio de la ZRP "ver Fig.4a". La magnitud de los vectores aumenta, y los valores máximos totales se concentran en este sector, tal como lo muestra la escala de colores. La componente vertical de los vectores de velocidad sube progresivamente a medida que las partículas ingresan en el sector adyacente a la placa de alto impacto que genera la falla principal. En este punto, se define también en este estadio, la zona de vectores paralelos (ZVP) donde el movimiento del material exhibe vectores de velocidad paralelos a dicha placa "ver Fig.4a". Gradualmente, los vectores se colocan paralelos a la falla principal. No existe un límite neto entre ambas zonas delimitadas, pero la aparición de la componente Vy se da antes en aquellos vectores que reflejan el movimiento de las partículas en los niveles superiores. La rotación en la base del modelo ocurre solamente en aquellas partículas situadas al lado de la placa de alto impacto, de allí que el inicio de la ZRP sea señalado con una línea diagonal punteada "ver Fig. 4a". Si bien todavía no se encuentra configurado el flanco frontal del anticlinal, en el sector superior que le corresponde también se observan magnitudes mayores para los vectores de velocidad. Resulta llamativo que las mayores magnitudes de velocidad se encuentren en el sector central del modelo, en la ZRP, en lugar de localizarse en el sector aledaño al pistón móvil.

En etapas posteriores del experimento, se aprecia la configuración del limbo frontal y es posible definir la zona que muestra la nueva rotación (ZNR). Este sector presenta forma de triángulo invertido con el ápice localizado en el extremo superior de la falla principal "ver Fig.4b". No presenta simetría con respecto a la misma. Las partículas que constituyen el limbo frontal ingresan en la ZNR con vectores de velocidad paralelos a la placa de alto impacto. Progresivamente, disminuye la componente vertical del vector velocidad Vy, que era la dominante en el bloque colgante. A su vez, aumenta nuevamente la componente horizontal del vector velocidad, Vx, la cual había disminuido previamente dentro de la ZRP. En cuanto a la magnitud de los vectores analizados, presentan valores mayores de velocidad en el centro del bloque colgante de la falla.

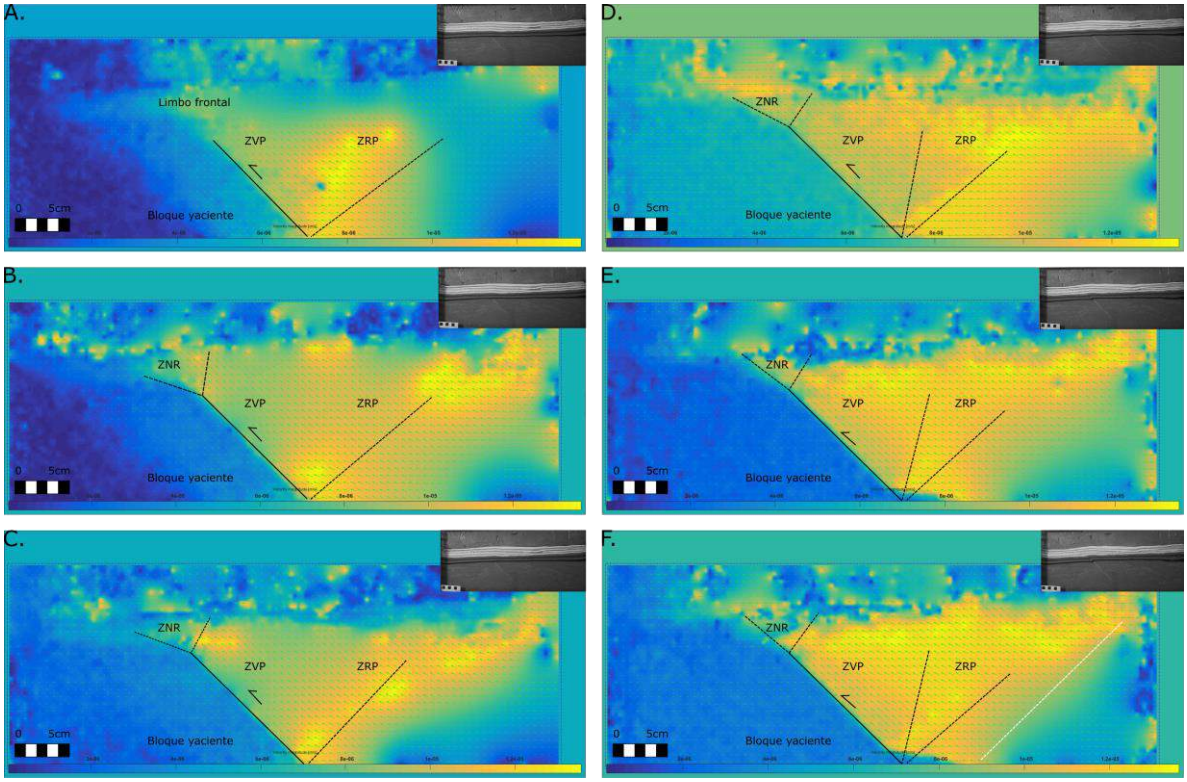


Figura 4. Campo de velocidad total graficado por medio de una escala de colores donde los valores máximos se representan en color amarillo y los valores mínimos se exhiben en color azul. La posición de la placa de alto impacto que actúa como falla principal se representa con una línea recta negra. El inicio de la zona de rotación progresiva (ZRP) se marca con línea punteada. Dentro de esta zona aparece y aumenta la componente Vy del vector velocidad. ZVP hace referencia a la zona de vectores paralelos, donde los mismos se presentan paralelos a la falla principal. En el bloque yaciente casi no se registra movimiento de las partículas. **a.** La fotografía corresponde a los 7 minutos de compresión (1,05 cm de acortamiento, siendo el 8,75% del valor total alcanzado). Si bien la fotografía del experimento todavía no muestra el limbo frontal configurado, en el sector se pueden apreciar también altos valores de magnitud. **b.** La fotografía corresponde a los 10 minutos de compresión (1,5 cm de acortamiento, siendo el 12,5% del valor total alcanzado). Aparece la zona de nueva rotación (ZNR) en el limbo frontal del pliegue. **c.** La fotografía corresponde a los 13 minutos de compresión (1,95 cm de acortamiento, siendo el 16.25% del valor total alcanzado). La zona de vectores paralelos (ZVP) crece. **d.** La fotografía corresponde a los 16 minutos de compresión (2,40 cm de acortamiento, siendo el 20% del valor total alcanzado). Los límites de la zona de rotación progresiva (ZRP) se marcan con línea punteada. La zona de vectores paralelos (ZVP) aumenta su tamaño. Se estructura el limbo frontal del anticlinal. **e.** La fotografía corresponde a los 19 minutos de compresión (2,85 cm de acortamiento, siendo el 23,75% del valor total alcanzado). La zona de vectores paralelos (ZVP) aumenta su tamaño a expensas de la ZRP. Los límites de la ZNR son dinámicos. En particular, el inferior tiende a rotar para quedar posicionado paralelo a la placa, como una prolongación de esta. **f.** La fotografía corresponde a los 22 minutos de compresión (3,3 cm de acortamiento, siendo el 27,5% del valor total alcanzado). El limbo frontal se encuentra configurado y aparece un retrocorrimiento, señalado con línea punteada blanca.

Hacia el límite con el bloque yaciente, la magnitud decrece “ver Fig. 4b". Las 3 zonas configuradas se presentan en los siguientes estadios del modelo análogo estudiado. Se puede notar el aumento del rechazo de la falla principal, debido a la separación de los bancos de arena “ver Fig. 4c”. La diferencia principal con respecto a las fases previas es que la zona donde se concentran los vectores paralelos (ZVP) a la falla principal aumenta su espesor a expensas de la zona de rotación progresiva (ZRP) “ver Figs. 4c y

4d". A partir de esta etapa, y en estadios posteriores, es posible definir el límite entre las zonas de rotación progresiva y de vectores paralelos "ver Figs. 4d y 4e". Los límites de la zona de nueva rotación (ZNR) no son fijos, por el contrario, tienden a desplazarse. En comparación con las etapas analizadas previamente, en fases más avanzadas de la evolución del pliegue por propagación de falla, se observa una disminución del ancho de esta zona de rotación. Esto se da en particular por la migración del borde situado sobre el bloque yaciente, que rota y se posiciona como una prolongación de la placa de alto impacto "ver Fig. 4e". Finalmente, el pliegue por propagación de falla queda bien configurado. A partir de este estadio, y pese a la colocación de la placa horizontal en la base de la caja para impedirlo, se observa la presencia de un retrocorrimiento "ver Fig. 4f". No ocurre la aparición de fallas inversas menores en el sector del bloque yaciente. La configuración del campo cinemático descripta se conserva hasta el final del modelo análogo.

DISCUSIONES

Al respecto del campo cinemático, se observan en la serie de fotografías analizadas dos rotaciones. En el bloque colgante del experimento realizado, la tendencia general es que los vectores ganan progresivamente componente vertical Vy hasta posicionarse de manera paralela a la falla principal simulada con la placa de alto impacto. El campo cinemático inicialmente es dominado por la componente horizontal Vx, en el sentido impuesto por el pistón. La zona de rotación puede ser esquematizada con forma de triángulo invertido, con el ápice situado hacia la base del modelo y aledaño al límite inferior de la falla. Los vectores que identifican el movimiento de las partículas situadas en niveles superiores muestran la aparición de la componente vertical Vy antes que aquellos localizados en los niveles inferiores. Esto se atribuye a cuestiones experimentales ya que la fricción basal generada por el borde de la caja tiene influencia. En los primeros estadios de este modelo análogo, el inicio de la rotación puede esquematizarse por medio de una línea recta, y en etapas posteriores es posible definir el límite entre el sector donde se aprecia la rotación progresiva y el sector donde los vectores ya se colocan paralelos a la falla. En esta zona, denominada zona de vectores paralelos, domina la componente vertical del vector velocidad. Justo arriba del *tip* de la falla principal, ocurre una nueva rotación en el área frontal. Al igual que en caso anterior, la zona se esquematiza como un triángulo invertido con el ápice localizado en el *tip* de la falla. La zona delimitada es asimétrica con respecto a esta, y sus bordes son dinámicos. El campo vectorial en el sector del bloque colgante es paralelo a la falla, y a medida que las partículas ingresan en esta zona, los vectores que muestran el movimiento sufren la disminución de la componente vertical Vy junto con el gradual aumento de la componente horizontal Vx. La rotación progresa a medida que los vectores pierden magnitud hasta tender a cero en la zona del límite inferior situado en el lado del bloque yaciente. En cuanto a la dinámica de los bordes, el cambio es muy notorio en este límite inferior, ya que termina quedando paralelo a la falla principal, como una prolongación de la placa de alto impacto.

Se observa que el pliegue representado en el modelo análogo y el campo vectorial obtenido se ajustan bien al modelo de *Trishear* "ver Fig. 1": Se aprecia que en extremo

superior de la falla hay una zona de geometría triangular que acumula mayor deformación en la configuración del limbo frontal del pliegue y a medida que las partículas se acercan al límite con el bloque yaciente de la falla, los vectores de velocidad disminuyen su magnitud. Las primeras descripciones asociadas a este método señalan que, en el tope de la zona de cizalla, los vectores son similares en sentido y magnitud a los del bloque colgante de la falla (Allmendinger R.W., 1998). Esta característica se registra bien en los gráficos del modelo análogo presentado "ver Fig. 4". El área que se describe a lo largo de este trabajo como la zona de nueva rotación localizada a partir del extremo superior de la falla principal es equivalente a la zona de *Trishear* asimétrica descripta por primera vez en el trabajo de Zehnder A.T. y Allmendinger R.W., 2000. En este caso, los ángulos de los límites situados en los lados correspondientes al bloque colgante y yaciente de la falla no son iguales, siendo el primero mayor "ver Fig. 5". En la bibliografía se pueden encontrar numerosos trabajos que ilustran la dinámica de estos límites, como en el artículo de Mitra S. y Miller J.F., 2013 donde efectúan un modelo análogo elaborado con arcilla. La diferencia principal con el experimento presentado en este trabajo es que la zona de *Trishear* es definida a partir de las estructuras secundarias y la deformación total, por lo tanto, se expande a medida que progresa el modelo análogo "ver Fig. 6". En el caso del modelo análogo realizado en este experimento, la zona se define a partir de los vectores cinemáticos y lo que se observa es que inicialmente la zona de rotación con forma triangular posee mayor tamaño "ver Fig. 5a" que, en los estadios posteriores, donde el borde inferior situado del lado del bloque yaciente de la falla migra "ver Fig. 5b". Por lo tanto, si se define la zona en base a la rotación de los vectores, es posible plantear que el ancho disminuye. Ahora, si se define en base a la deformación total generada, es cierto que se expande, como bien lo señala el artículo de Mitra S. y Miller J.F., 2013 "ver Fig. 6".

CONCLUSIONES

En el modelo se definen tres zonas a partir de la tendencia general que siguen los vectores cinemáticos. El movimiento se inicia con vectores que tienen una única componente horizontal en la dirección impuesta por el pistón, y luego rotan con un progresivo aumento de la componente vertical. Se define este sector como la zona de rotación progresiva. Luego los vectores cinemáticos tienden a colocarse paralelos a la falla principal a medida que las partículas migran dentro del área definida como zona de vectores paralelos. Cerca del extremo superior de la falla principal ocurre una rotación nueva en un área con forma triangular cuyo ápice se ubica en el *tip* de la falla. Esta zona es equivalente a la de *Trishear* en los modelos teóricos propuestos para reconstruir pliegues por propagación de falla. A diferencia de modelos análogos realizados con arcilla previamente por otros autores, donde se analiza la deformación total y el tamaño de la zona a partir de fallamiento secundario, aquí es posible sostener que la zona disminuye su espesor, ya que se observa la migración del borde inferior situado hacia el lado del bloque yaciente de la falla, hasta colocarse casi paralelo a la misma. Por lo tanto, ocurre la disminución del ángulo que la caracteriza. La zona done ocurre la rotación es asimétrica con respecto a la placa del alto impacto. El bloque colgante de la falla no se comporta como un bloque rígido, por el contrario, también sufre deformación a medida que se configura el anticlinal. La pasta azucarada resulta ser un material apto

para generar este tipo de pliegues, a partir de la influencia de la placa de alto impacto que simula ser una falla inversa que se propaga, afectando también material con comportamiento granular como la arena.

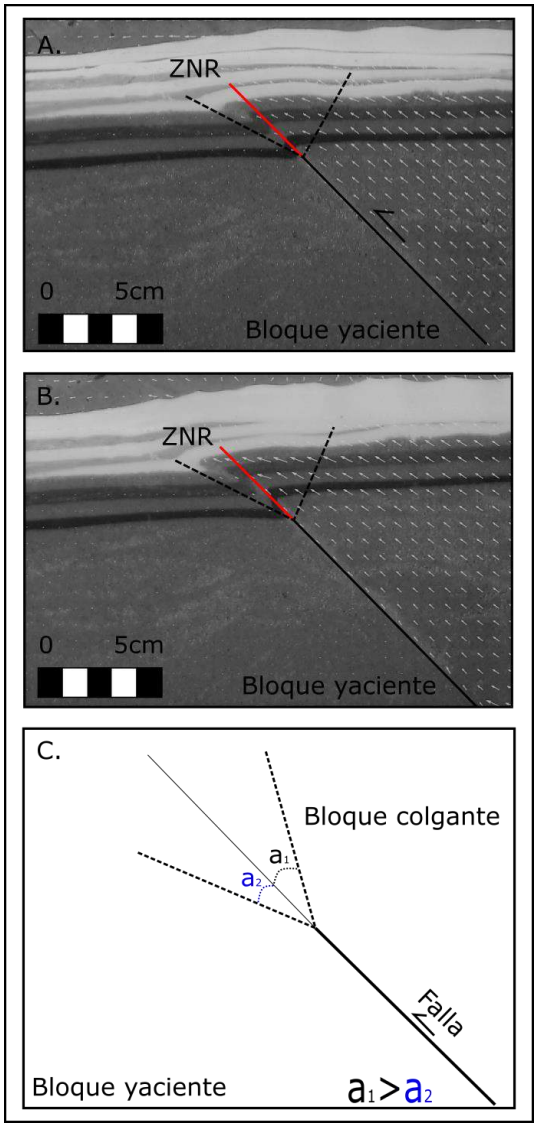


Figura 5. Zona de nueva rotación (ZNR) señalada en el modelo análogo. La falla principal se marca con línea continua negra. Las líneas punteadas indican los límites de la zona de nueva rotación. La línea roja esquematiza la prolongación de la falla. **a.** Campo de velocidad total graficado sobre la fotografía que corresponde a los 14 minutos de compresión, 2,10 cm de acortamiento alcanzados representando el 17,50% del total. **b.** Campo de velocidad total graficado sobre la fotografía que corresponde a los 20 minutos de compresión, 3 cm de acortamiento alcanzados representando el 25% del total. **c.** La zona de rotación progresiva es comparable al *Trishear* asimétrico. En este caso puntual, el ángulo correspondiente al lado situado en el bloque colgante es mayor al ángulo correspondiente al lado situado hacia el bloque yaciente de la falla principal (Modificado de Zehnder A.T. y Allmendinger R. W., 2000).

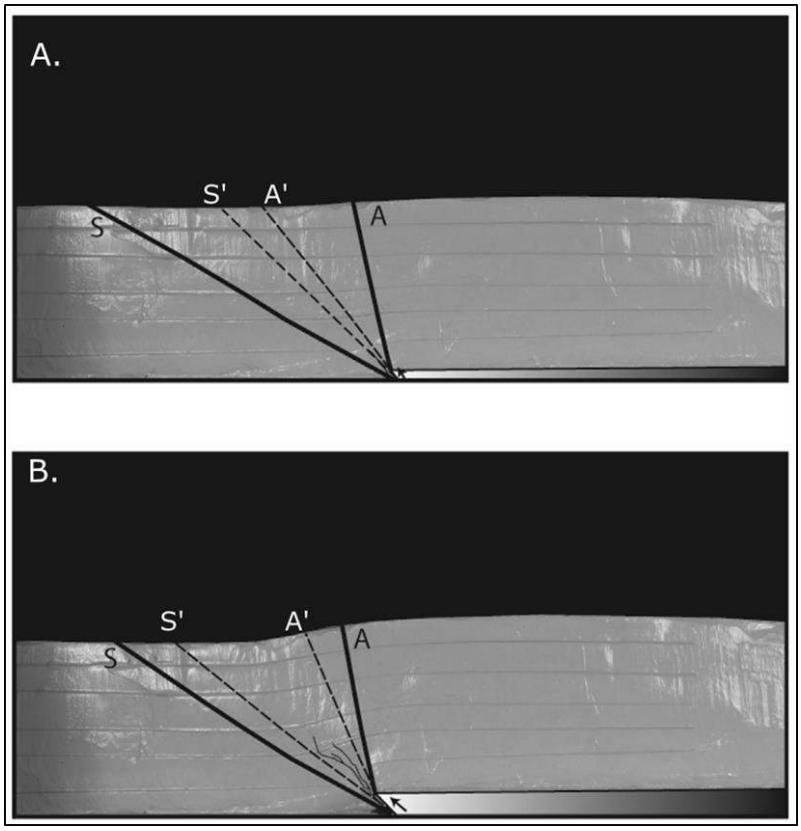


Figura 6. Progresiva evolución de la zona de *Trishear* para deformación compresiva asociada a una falla de basamento a 45° de inclinación. En línea recta se marcan los límites finales de la zona, A situado hacia el bloque colgante y S ubicado en el bloque yaciente de la falla inversa. A' y S' corresponden a la posición de dichos límites en cada estadio del modelo análogo realizado en arcilla. Se observa que la zona de *Trishear* se expande. **a.** Estadio inicial del modelo. **b.** Estadio intermedio del modelo (Modificado de Mitra S. y Miller J.F., 2013).

REFERENCIAS

Allmendinger, R.W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17: 640-656 (1998).

Brandes, C. y Tanner, D.C. Fault-related folding: A review of kinematic models and their application., *Earth-Science Rev.* (2014).

Erslev, E. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, 617-620 (1991).

Erslev, E. y Rogers, J.L. Basement-cover geometry of Laramide fault-propagation folds: Laramide Basement Deform. Rocky Mt. Forel. West. United States. *Geological Society of America Special Paper* 280, 125–146 (1993).

Fan, X., Jia, D., Yin, H., Shen, L., Liu, J., Cui, J., Chuang, S., Yang, S. Analogue modeling of the northern Longmen Shan thrust belt (eastern margin of the Tibetan plateau) and strain analysis based on Particle Image Velocimetry, *J. Asian Earth Sci.* (2020).

Hubbert, M. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Am.* 48, 1459–1520 (1937).

Jamison, W. R. Geometric analysis of fold development in over thrust terranes. *J. Struct. Geol*. 9, 207-219 (1987).

McClay, K.R. The rheology of plasticine. *Tectonophysics* 33 (1976).

Mitra, S., Miller, J.F. Strain variation with progressive deformation in basement-involved trishear structures. *J. Struct. Geol.* 53, 70–79 (2013).

Termini, D., Di Leonardo, A. Efficiency of a digital particle image velocimetry (DPIV) method for monitoring the surface velocity of hyper-concentrated flows. *Geosciences (Switzerland)* (2018).

Thielicke, W. y Stamhuis, E. J. PIVlab - Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. J. *Open Res. Softw.* 2, e30 (2014).

Rosas, F.M., Duarte, J.C., Almeida, P., Schellart, W.P., Riel, N., Terrinha, P. Analogue modelling of thrust systems: Passive vs. active hanging wall strain accommodation and sharp vs. smooth fault-ramp geometries. *J. Struct. Geol.* 99, 45–69 (2017).

Saffar, M. Al. Geometry of fault-propagation folds: method and application. *Tectonophysics*, 223(3–4), 363–380 (1993).

Saha, P., Bose, S., Mandal, N. Sandbox modelling of sequential thrusting in a mechanically two-layered system and its implications in fold-and-thrust belts. *J. Geodyn*. 100, 104–114 (2016).

Shaw, J.H., Novoa, E., Connors, C.D. Structural controls on growth stratigraphy in contractional fault-related folds. *AAPG Mem.* 400–412 (2005).

Shinevar, W.J., Behn, M.D., Hirth, G., Jagoutz, O. Inferring crustal viscosity from seismic velocity: Application to the lower crust of Southern California. *Earth Planet. Sci. Lett.* 494, 83–91 (2018).

Suppe, J. y Medwedeff, D. A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geol. Helv.* 83(3), 409–454 (1990).

White, D.J., Take, W. A. GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing., *Cambridge University Engineering Department Technical Report* (2002).

Zehnder, A.T., Allmendinger, R.W. Velocity field for the trishear model. *J. Struct. Geol.* 22, 1009–1014 (2000).

Zulauf, J., Zulauf, G. Rheology of plasticine used as rock analogue: The impact of temperature, composition and strain. *J. Struct. Geol.* 26, 725–737 (2004).

FACTORES QUE CONTROLAN LA CONCENTRACIÓN DE FLÚOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL ARROYO LAS PEÑAS, SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA, ARGENTINA

Prámparo, S.[a], Blarasin, M.[b], Giacobone, D.[ab], Becher Quinodoz, F.[ab] y Degiovanni, S.[a]

[a] *Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA*
[b] *CONICET, ARGENTINA*

e-mail: santi.pramparo@gmail.com

RESUMEN

La cuenca del arroyo Las Peñas, ubicada en las Sierras Pampeanas de Córdoba (Argentina), presenta aguas subterráneas con características específicas de gran interés para las actividades socio-económicas locales. Los valores de F^- (flúor) en el agua subterránea (0,2 a 3,9 mg/L) fueron controlados principalmente por las características geomorfológicas y litológicas, las que a su vez condicionan la dinámica y química del agua subterránea. Los valores más altos de F^- se encontraron en sectores caracterizados por una predominancia de capas sedimentarias loéssicas, especialmente en la unidad geomorfológica Paleosuperficie relíctica principal, situada en cuenca alta. Con el objetivo de evaluar el origen del flúor en el agua, se utilizaron las relaciones molares de iones mayoritarios y minoritarios vinculados a fluorita y apatita, minerales comunes en la cuenca de estudio, donde solo unas pocas muestras de agua subterránea, pertenecientes a la Paleosuperficie relíctica principal, se asociaron a la línea de disolución de la apatita. De esta manera, suponiendo que ninguno de estos minerales (fluorita y apatita) constituyen los principales contribuyentes de fluoruros en solución, y teniendo en cuenta que los valores más altos se asociaron a los depósitos loéssicos de la Paleosuperficie relíctica principal, puede asumirse que el vidrio volcánico, abundante en este tipo de sedimentos, es la principal fuente de flúor en el agua subterránea. Asimismo, es necesario un entorno geoquímico específico que permita la transferencia de elementos químicos desde los minerales al agua subterránea. De esta forma, los resultados del tratamiento de datos, incluyendo el análisis estadístico multivariado, demuestran que los valores más altos de F^- en el agua subterránea, que a su vez se encuentran altamente correlacionados con elevados contenidos de arsénico, están vinculados a un ambiente alcalino de agua bicarbonatada sódica con altos valores de pH.

Palabras Clave: Hidrogeología, Geoquímica, Elementos traza

INTRODUCCIÓN

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2019) expresa de manera contundente que es necesario mejorar la gestión de los recursos hídricos y proporcionar acceso al agua potable y saneamiento seguros. De esta manera, resulta indispensable impulsar políticas estratégicas e interdisciplinarias vinculadas a la investigación de la dinámica, calidad y disponibilidad del agua subterránea, a fin de ampliar el campo actual de conocimientos sobre este recurso y mejorar los aspectos vinculados con su planificación y gestión. Un desafío importante es conocer en detalle

los aspectos geoquímicos del agua, siendo de especial interés el conocimiento de los elementos traza disueltos en ella que puedan ser nocivos para la salud, tales como el As (arsénico) y el F^- (flúor). Algunos de los numerosos antecedentes que tratan sobre las enfermedades causadas por estos elementos, en particular relacionados al flúor, pueden hallarse en Armienta y Segovia (2008), Viero et al. (2009), entre otros. El flúor existe en cantidades mínimas en casi todas las aguas subterráneas del mundo (Amini et al., 2008). Además de las fuentes naturales, tales como las emisiones volcánicas o la meteorización de minerales, este elemento puede derivar de fuentes antrópicas (por su extendido uso como materia prima en la industria química). Sin embargo, el agua con altas concentraciones de F^- generalmente es de origen natural y representa una amenaza para la salud de millones de personas que ingieren agua con concentraciones de F^- que superan el límite actual establecido por la OMS (1,5 mg/L). La fluorosis puede provocar decoloración y deterioro de dientes y huesos y, en casos graves, pérdida de movilidad (Amini et al., 2008).

La Llanura Pampeana Argentina es una de las regiones del mundo donde el agua subterránea puede presentarse con altas concentraciones de algunos elementos traza, tales como arsénico, flúor, cadmio, uranio, vanadio, entre otros (García et al., 2012; Blarasin et al., 2011, 2014, 2016; Matteoda y Blarasin, 2013; Bécher Quinodoz et al., 2019; Matteoda et al., 2019). El origen de estos elementos químicos suele interpretarse como derivado principalmente de sedimentos eólicos (Nicolli et al., 1989, 2012; García et al., 2012; Blarasin et al., 2011, 2014). Entre ellos, el As y el F^- constituyen los iones más estudiados en las aguas subterráneas de la región por su evidente incidencia en la salud humana. En la provincia de Córdoba, se ha identificado fluorosis dental en niños, jóvenes y adultos (Blarasin et al., 2011) mientras que la enfermedad por arsenicismo ha sido descripta en la zona oriental de la provincia (Ayerza, 1917; Goyenechea 1917).

El agua subterránea es fundamental en la provincia de Córdoba ya que está involucrada en diferentes fenómenos naturales y, a su vez, es el recurso hídrico más utilizado en la región, convirtiéndose en el soporte de diversas actividades (domésticas, industriales, ganaderas, riego, entre otras) (Blarasin et al., 2014). Aunque los estudios relacionados al agua subterránea se han realizado, en general, en los acuíferos sedimentarios de la Llanura Pampeana, aún no existen investigaciones en detalle de su comportamiento en las cuencas altas de los cursos, desarrollados mayoritariamente en las áreas montañosas de la provincia. En el marco hidrogeológico regional, es necesario analizar la geoquímica de estas zonas, que funcionan principalmente como áreas de captación de agua de lluvia para su posterior distribución hacia las zonas bajas.

La cuenca del arroyo Las Peñas posee características específicas y peculiares cuya investigación puede aportar información de interés para el desarrollo de actividades socio-económicas locales y el correcto manejo del agua y el ambiente. Esta cuenca drena el flanco oriental de la Sierra de Las Peñas (cordón serrano ubicado en las Sierras Pampeanas de Córdoba) y desemboca en el área pedemontana y la planicie fluvio-eólica adyacente. Esta serranía se encuentra en proceso de exhumación y mantiene superficies erosivas pre-Andinas con diferente grado de preservación (Carignano et al., 2014; Degiovanni, 2008). En este contexto geológico, se ha propuesto como hipótesis de investigación que los diferentes relieves con características litológicas y geomorfológicas distintivas controlan la dinámica y calidad del agua subterránea y, en especial, las concentraciones de F^- disueltas en ella. Asimismo, el objetivo de este trabajo consiste en definir las características hidrogeológicas de la cuenca y los principales factores que controlan la geoquímica de los fluoruros en el agua subterránea.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y GEOMORFOLÓGICA

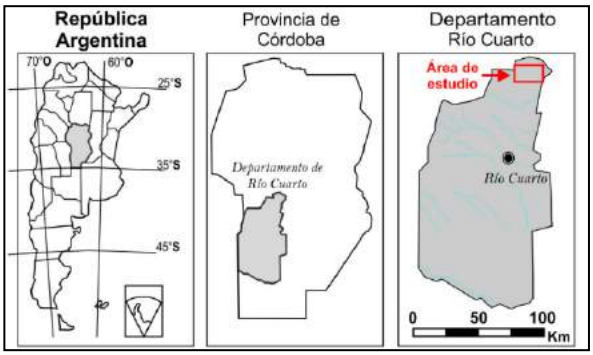


Fig.1: Ubicación del área de estudio.

La cuenca del arroyo Las Peñas (200 km^2) se ubica al NE del Departamento Río Cuarto, en la Provincia de Córdoba, Argentina (Fig.1). El clima regional es de tipo mesotermal subhúmedo con poco o nulos excesos hídricos. La distribución de las precipitaciones presenta una estacionalidad muy marcada, con una concentración del 75% de noviembre a marzo (primavera-verano) y una precipitación media anual de 757,4 mm. Los afloramientos rocosos de la Sierra de las Peñas tienen edades desde el Neoproterozoico hasta el Paleozoico Inferior. Las litologías incluyen paragneises, paraanfibolitas, mármoles impuros, ortogneises y ortoanfibolitas (Bonalumi et al., 2005). Además del complejo metamórfico, existe un gran cuerpo ígneo granítico (Granito Las Peñas) cuya edad se asigna al Cámbrico Inferior. El gneis biotítico es el tipo litológico con mayor representación areal. Está compuesto por cuarzo, plagioclasa, muscovita y biotita, con abundante granate en algunos sectores. Las ortoanfibolitas son abundantes y también hay rocas migmáticas, pequeños afloramientos de metacuarcitas, pegmatitas y algunos bancos de mármol. El granito Las Peñas tiene una textura milonítica y las asociaciones minerales incluyen cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita, muscovita, magnetita, pertita y cuarzo. Geoquímicamente, el granito tiene una composición calco-alcalina con tendencia potásica (Bonalumi et al., 2005).

En los sedimentos eólicos regionales, investigadores locales (Matteoda, 2012; Blarasin et al., 2014) establecieron que las fracciones dominantes de arena muy fina y limo presentan un porcentaje en peso de minerales ligeros del orden del 98% y de minerales pesados del orden del 2%. Los minerales ligeros son vidrio volcánico (hasta 55%), feldespato potásico y plagioclasa (An 25-40) (20%), agregados minerales volcánicos (14%), cuarzo (3%) y alteritas (5%), mientras que los pesados comprenden minerales opacos (óxidos 0,4%, anfíboles 0,7%, piroxenos 0,2%, biotitas 0,05%, alteritas 0,4%) y contenidos menores de apatita, granate y otros. En la fracción arcillosa predomina la illita. En la zona de la Sierra de Las Peñas, Matteoda (2012) identificó 3 tipos de vidrio volcánico: VG1: incoloro, con burbujas, tipo dacítico-riolítico; VG2: pardusco, con alteraciones palogoníticas, tipo basáltico y andesítico y V3: muy alterado, con Fe, tipo basáltico.

Desde el punto de vista geomorfológico, la génesis del relieve local está asociada a la interacción entre procesos tectónicos, relacionados con la Orogenia Andina, y diferentes procesos exógenos, controlados por variaciones climáticas del Pleistoceno Superior y Holoceno, los que modelaron parcialmente la superficie preexistente y las características actuales del paisaje (Degiovanni, 2008; Carignano et al., 2014). Las características geomorfológicas más destacadas incluyen el control estructural (fallas inversas regionales) y el grado diferencial de disección presente en el bloque serrano. La Sierra de las Peñas es un megabloque de basamento plutónico-metamórfico que aún conserva relieves antiguos muy poco modificados (Mesozoico-Paleógeno), los cuales coexisten con geoformas neógeno-cuaternarias. Presenta un perfil asimétrico transversal,

caracterizado por una escarpa levemente empinada orientada al Oeste y una pendiente estructural suave orientada al Este. El bloque se encuentra fuertemente disectado por la red de drenaje del arroyo Las Peñas (diseño dendrítico rectangular), conservando paleosuperficies erosivas relícticas en las áreas cumbrales. Este sistema, desarrollado en rocas del basamento cristalino y en valles intermontanos de relleno sedimentario cuaternario, se encuentra fuertemente controlado por las estructuras del sector. En cuenca alta, las geoformas dominantes reflejan diferentes grados de conservación de antiguas superficies, las cuales fueron disectadas por la acción fluvial (Degiovanni, 2008; Carignano et al., 2014). Los principales rasgos asociados a las unidades geomorfológicas (Fig. 2), definidas en Prámparo (2020), comprenden un relieve suavemente ondulado, pendiente general baja (1- 2%) y cubierta de sedimentos fundamentalmente eólicos pertenecientes a la *Paleosuperficie relíctica principal* (Unidad 1.a), roca aflorante del sector central, altamente disectada por un sistema de drenaje subdendrítico instalado en los valles intermontanos (*Paleosuperficie disectada con afloramiento de roca y valles con relleno sedimentario*, Unidad 1.b) y potentes secuencias de abanicos aluviales, depósitos eólicos y eólicos retransportados del *Piedemonte* (Unidad 2).

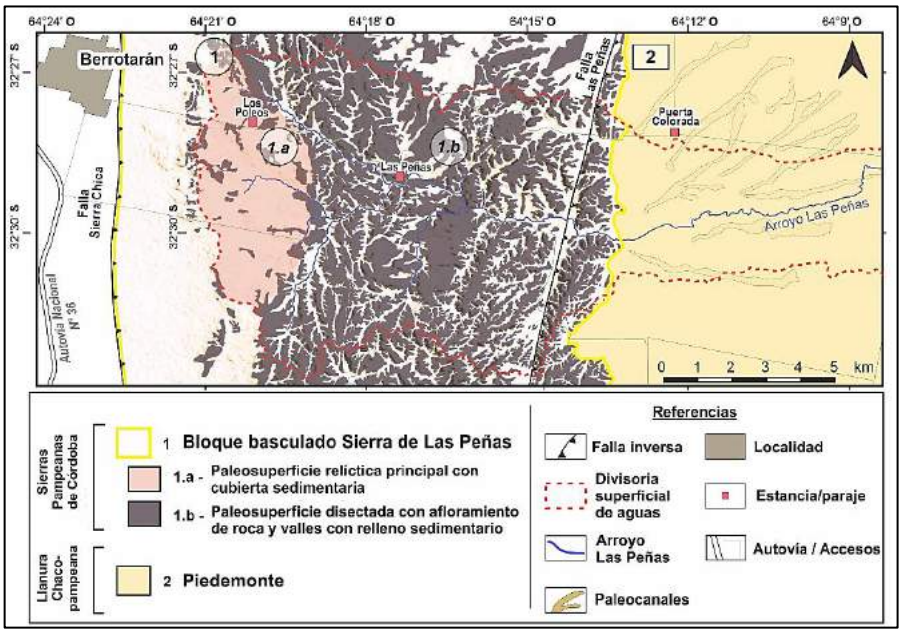


Fig. 2: Mapa de unidades geomorfológicas. Cuenca del arroyo Las Peñas (Prámparo, 2020).

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA GENERAL

La mayoría de los pozos muestreados captan agua del acuífero sedimentario libre, identificado en la Paleosuperficie relíctica principal (Unidad 1.a), en los principales valles de la Unidad 1.b y en el entorno sedimentario del piedemonte (Unidad 2). Sin embargo, 6 pozos, situados en las unidades 1.a y 1.b, penetran parcialmente unos pocos metros del macizo rocoso fracturado. El acuífero libre estudiado exhibe litologías variadas. En la unidad 1.a está compuesto por arenas muy finas con un alto porcentaje de limos, evidenciando un origen principalmente eólico. En los valles de la unidad 1.b, el acuífero está constituido dominantemente por depósitos finos (eólicos retransportados), con capas finas de material grueso (arenas y gravas) de origen aluvial/coluvial. En la unidad 2, el sistema acuífero está constituido por materiales clásticos de origen eólico (arenas muy finas), sedimentos eólicos retransportados y algunas intercalaciones de depósitos areno-

gravosos, ligados a paleoabanicos aluviales de la Sierra de Las Peñas. A su vez, es frecuente la presencia de sales carbonatadas (calcita) dispersas en los sedimentos o como nódulos y capas de calcretas. Las características litológicas mencionadas muestran una notable heterogeneidad de materiales constituyentes (Prámparo, 2020). Teniendo en cuenta los sedimentos descriptos, existe una importante diversidad de porosidad específica (pe) y, en consecuencia, de valores de conductividad hidráulica (K), los cuales son del orden de 1 m/d -10 m/d. Además, dado el espesor variable de los depósitos sedimentarios (pocos metros en la paleosuperficie relíctica y en los valles y varias decenas de metros en el piedemonte), el acuífero muestra una transmisividad espacial (T) muy variable, entre 4 m^2/d - 600 m^2/d. La dirección del flujo de las aguas subterráneas es predominantemente O-E y los gradientes hidráulicos son del orden de 1,1 a 2,5% (Fig. 3 y Fig. 4). En este marco hidrogeológico, sólo el colector principal presenta régimen permanente (por aporte del acuífero freático), aunque luego el agua del arroyo se infiltra al llegar al piedemonte oriental, donde la capa freática alcanza una profundidad de 20 a 30 m (Fig. 3, Prámparo, 2020).

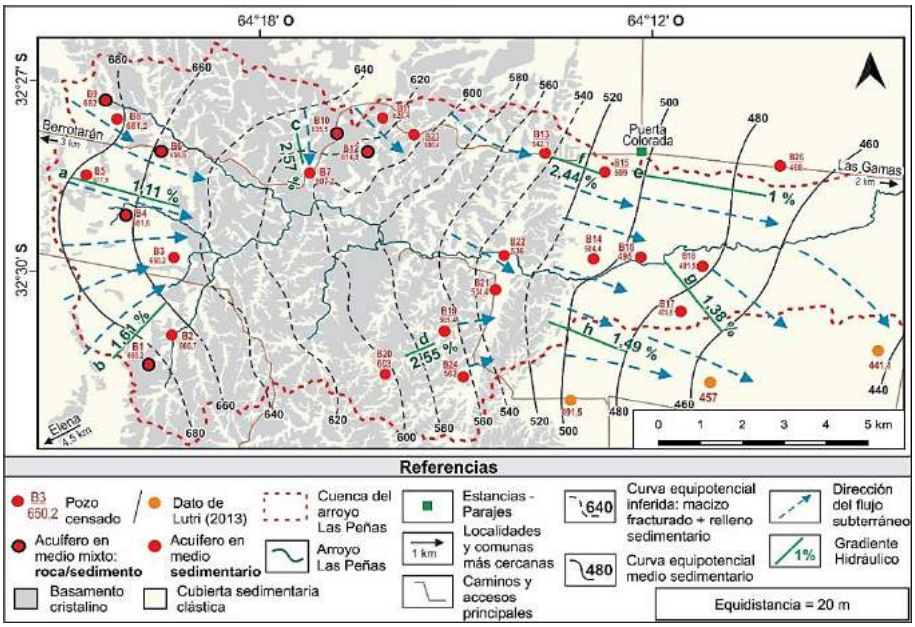


Fig.3: Mapa de equipotenciales del acuífero libre. Cuenca del arroyo Las Peñas (Prámparo, 2020).

El agua subterránea es dulce a salobre, con conductividades eléctricas entre 586 µS/cm y 3.880 µS/cm. El carácter geoquímico es principalmente bicarbonatado cálcico (Unidad 1.b) y bicarbonatado sódico (unidad 1.a), con algunas muestras de tipo mixto (Unidad 2) (Fig. 4). En cuanto al origen de los compuestos químicos disueltos, dada la improbable existencia de yeso y halita en los sedimentos y rocas de la cuenca y la nula relación de los iones Na^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-} y Cl^- con las líneas de disolución de estos minerales (Prámparo, 2020), se estima que estos elementos químicos son aportados, principalmente, por las lluvias. Teniendo en cuenta la información química de las precipitaciones regionales (Cabrera et al., 2013), estas pueden contribuir con una parte del resto de los iones mayoritarios (Mg^{2+}, K^+, HCO_3^-).

En la mayoría de las aguas naturales, la alcalinidad deriva principalmente del equilibrio con el CO_2 atmosférico y del suelo y también de la disolución de los minerales carbonatados. El análisis de las diferentes relaciones molares de los principales iones, realizado por Prámparo (2020), mostró que la geoquímica de las aguas subterráneas está principalmente vinculada a procesos de meteorización de los silicatos. Así, parte de la

concentración de HCO_3^- Na^+ y Ca^{2+} se explicaría por el efecto de la hidrólisis de andesina, especialmente en el sector central del macizo rocoso. La contribución del Ca^{+2} también estaría parcialmente asociada a la disolución de calcita. La liberación de Na^+, Mg^{2+} y K^+ a la solución no sólo estaría vinculada al aporte de precipitaciones o a la meteorización de los silicatos, sino que también provendría de procesos de intercambio catiónico en sedimentos finos, como lo indican numerosos antecedentes regionales (Blarasin et al., 2014; Bécher Quinodóz et al., 2019). Teniendo en cuenta que las precipitaciones tienen un dominio de iones sulfato (Cabrera et al., 2013), el carácter bicarbonatado del agua subterránea en el sector central de la cuenca se explica por la alcalinidad generada por el CO_2 del suelo y la hidrólisis de los silicatos.

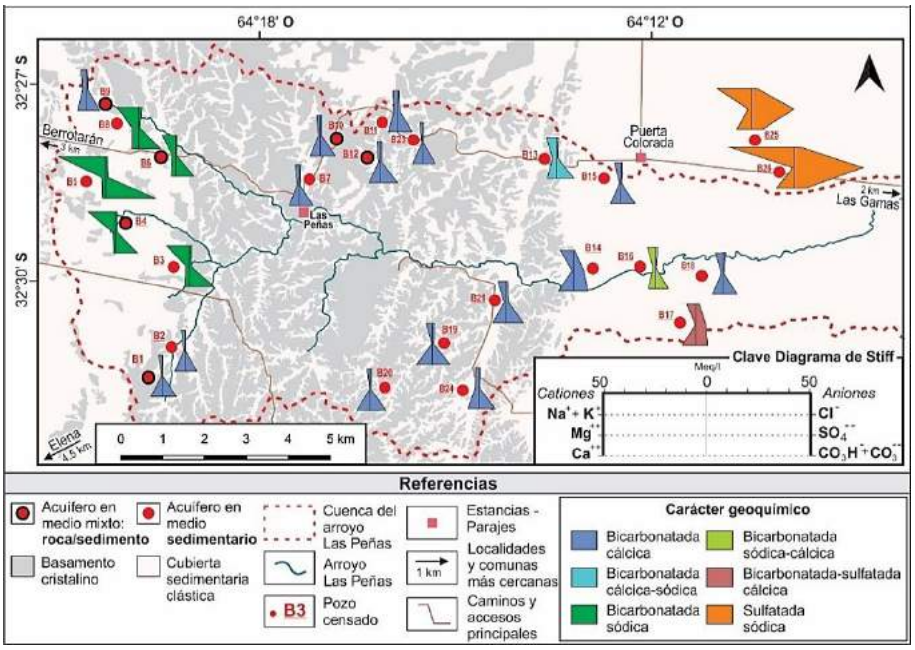


Fig.4: Clasificación geoquímica de las muestras de agua subterránea y su distribución en el área de estudio (Prámparo, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en base al análisis y recopilación de hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50.000 e imágenes satelitarias (Google Earth, Landsat ETM). Se analizó la información regional (geológica, geomorfológica, climática, etc.) de la zona de estudio (Blarasin et al, 2014; Carignano et al., 2014). Se analizaron e interpretaron los datos de precipitaciones utilizando una serie local de 25 años (1990-2015). La información hidrogeológica se obtuvo mediante el estudio de pozos de propietarios locales, que penetran en la parte superior (10-50 m) del acuífero libre. Las muestras de agua subterránea se obtuvieron en 25 pozos, en los que se midieron in situ parámetros como el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura (T) utilizando una sonda portátil multiparamétrica (Hanna HI 9829). Las muestras se recogieron en botellas plásticas de 1 L y se analizaron en el laboratorio de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Se analizaron los siguientes parámetros químicos: Na^+, K^+, HCO_3^-, Cl^-, Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, As y F^- (APHA, 2005), con un porcentaje medio de error inferior al 5%. El F^- se midió utilizando un electrodo selectivo de iones y el arsénico se determinó por medio de un espectrofotómetro UV Hatch, utilizando en ambos casos soluciones estándar con diferentes concentraciones. El software PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) permitió evaluar los índices de saturación en las muestras de agua subterránea. El análisis que

vincula las variables químicas se realizó mediante técnicas estadísticas descriptivas (tratamiento multivariado) por medio del software SPSS11.5 para Windows. En este sentido, para explicar las relaciones entre todas las variables químicas se realizó un análisis factorial (análisis de componentes principales, ACP) para la reducción de datos y el descifrado de los patrones dentro del conjunto. Las variables químicas se estandarizaron debido a las diferentes escalas del pH y la CE en relación con la unidad meq/L utilizada para las concentraciones de las variables químicas. El software estadístico utilizado permite a los usuarios decidir el número de CP a través del criterio de Kaiser-Guttmann (eigenvalor > 1), usando también el principio de Parsimonia.

FLÚOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los principales estadísticos descriptivos de las variables químicas analizadas se muestran en la Tabla I. Los valores de F^- varían entre 0,2 y 3,9 mg/L. Las concentraciones más elevadas se sitúan en la cuenca alta (Unidad 1.a) y el piedemonte (Unidad 2) (Fig. 5).

Tabla I: Estadísticos descriptivos. Acuífero freático de la cuenca del arroyo Las Peñas.

Parámetro	Unidad	N° de muestras	Min.	Máx.	Media	Mediana	Desviación típica
pH		25	7,1	8,3	7,6	7,5	0,3
CE	µS/cm	25	586,0	3880,0	1170,7	879,0	758,8
CO_3^{-2}	mg/L	25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HCO_3^-	mg/L	25	311,3	1502,5	510,5	447,5	231,9
SO_4^{-2}	mg/L	25	11,0	1569,1	144,9	26,4	354,3
Cl^-	mg/L	25	11,4	82,9	32,6	25,7	18,9
Na^+	mg/L	25	26,3	737,1	143,4	77,9	176,2
K^+	mg/L	25	4,1	20,8	15,2	14,5	5,2
Ca^{+2}	mg/L	25	18,4	180,8	97,6	98,4	38,7
Mg^{+2}	mg/L	25	0,5	37,3	13,2	11,2	8,9
F^-	mg/L	25	0,2	3,9	1,0	0,6	1,0
As	µg/L	25	0,1	110,0	20,7	7,0	30,3

En cuanto al posible origen de los iones F^- en el contexto geológico estudiado, deben considerarse ciertos minerales que forman parte del basamento rocoso. Como se estableció en Bonalumi et al., (2005), las rocas graníticas y metamórficas del entorno contienen minerales como biotita, apatita, epidota y hornblenda, que contienen flúor. Así, para evaluar el origen del flúor se han tenido en cuenta dos minerales comunes que muchos autores consideran responsables de suministrar F^- al agua subterránea: fluorita y apatita (Gout et al., 1997; Bécher Quinodóz et al., 2019). Las reacciones de disolución de ambos minerales se muestran en las ecuaciones 1 y 2.

$$CaF_2 \rightarrow Ca^{+2} + 2F^- \quad (1)$$

Disolución de fluorita

$$Ca_5(PO_4)_3F + 11\ CO_2 + 10H_2O \rightarrow 5Ca^{2+} + 3H_3PO_4 + 11HCO_3^- + F^- \quad (2)$$

Disolución de fluorapatita

Como puede observarse en la Fig. 6, sólo 3 muestras pertenecientes a la Unidad1.a están cerca de la línea de disolución de apatita. Esta aproximación no es suficiente para definir a este mineral ni a la fluorita como los principales contribuyentes de F^- al agua subterránea. Por lo tanto, puede decirse que el origen del flúor estaría vinculado a otras fuentes. Algunos autores (Nicolli et al., 1989, 2012) han establecido que la composición

química del vidrio volcánico en el loess argentino es típicamente riolítica, con SiO_2 oscilando entre 72,2 y 78,6 % y con valores variables de F^-, As y otros elementos traza.

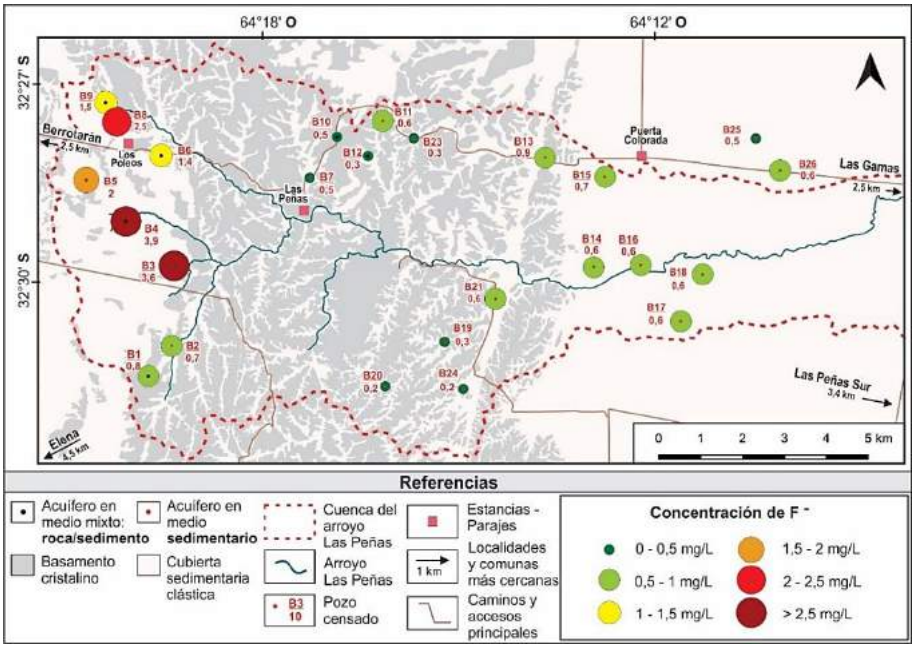


Fig.5: Mapa de concentración de F^- en las muestras de agua subterránea y su distribución espacial.

El contenido de As en el vidrio volcánico es relativamente bajo, ya que oscila entre 5 y 8 mg kg-1, mientras que el de F^- varía entre 109 y 1.020 mg kg-1 (Nicolli et al., 2012). Así, el vidrio volcánico y/o los fragmentos líticos volcánicos dentro del loess serían una fuente de As, F^- y otros elementos traza, liberados en los procesos de meteorización (Smedley et al., 1998). El vidrio volcánico es muy reactivo y, bajo condiciones de elevado pH, puede meteorizarse y aportar elementos minoritarios y trazas al agua subterránea (Nicolli et al., 1989; Blarasin et al., 2011). En los procesos volcánicos, el F^- forma parte de compuestos como el CaF_2, AlF_3 y $Ca_5(PO_4)_3F$ (Cronin et al., 2003). En estas fases, el F^- se libera durante períodos más largos, pero en las pruebas de laboratorio, un tercio se lixivia en una sola extracción de agua de 24 horas. Esto implica que la estimación del F^- soluble en cenizas volcánicas, basada en una sola lixiviación, lleva a subestimar el impacto del F^-, especialmente de un posible peligro ambiental a largo plazo (Cronin et al., 2003). Una explicación alternativa (Smedley et al., 1998) comprende la desorción del As y el F^- de la superficie de óxidos e hidróxidos de hierro bajo condiciones de alto pH, resultantes de la meteorización química. Las aguas subterráneas ricas en F^- suelen estar asociadas a bajas concentraciones de calcio o a condiciones de alto pH y aguas bicarbonatadas sódicas. Teniendo en cuenta que los iones HCO_3^- pueden competir en los sitios de adsorción, esta situación puede promover la desorción de los iones As y F^- (Blarasin et al., 2011, 2014; Nicolli et al., 2012). Además de la química de

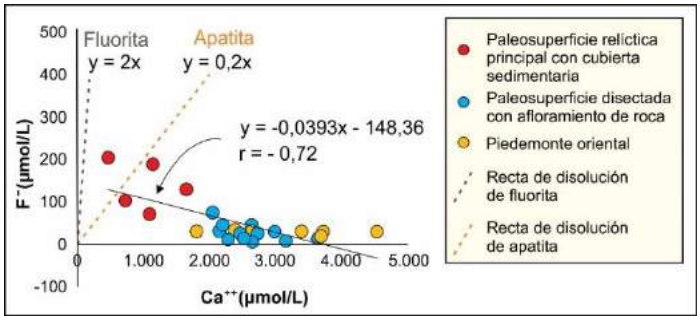


Fig. 6: Distribución molar entre F^-/Ca^{+2} y su relación con las curvas teóricas de disolución de fluorita y apatita.

las aguas subterráneas, las propiedades hidrológicas (por ejemplo, el tiempo de residencia) así como las condiciones climáticas (evapotranspiración, precipitaciones, etc.) tienen influencia en los valores de F^- (Smedley et al., 2000; Blarasin et al., 2014). Por lo tanto, las heterogeneidades espaciales y temporales de las concentraciones de F^- en las aguas subterráneas son particularmente grandes. En el área de estudio, la distribución espacial de la relación Na^+/Ca^{2+} muestra el predominio del Na^+ en aquellos ambientes donde los sedimentos eólicos y eólicos retransportados son dominantes (Unidad 1.a y Unidad 2). También es notoria la coincidencia entre los altos valores de la relación Na^+/Ca^{2+} y los altos valores de F^-. Las muestras con los valores más altos de F^-, ubicadas en el extremo occidental de la cuenca alta (Unidad 1.a) están relacionadas con aguas bicarbonatadas sódicas. En la Fig. 7 se observa que todas las muestras están subsaturadas en fluorita. Sin embargo, las muestras de la Unidad 1.a están más cerca del valor de saturación de la fluorita. Es decir, se han disuelto más cantidades debido a las condiciones litológicas y geoquímicas explicadas para esa zona, pero el F^- se sigue manteniendo en solución debido al tipo de agua bicarbonatada sódica predominante. Todas las muestras de la cuenca muestran valores similares de sobresaturación en calcita (Fig. 8) y no hay correlación entre el índice de saturación de calcita y los valores de flúor. Si el Ca^{2+} fuese predominante en la solución, podría precipitar fluorita, pero el dominio del Na^+ permite que el F^- permanezca estable en la solución, incluso para el agua sobresaturada en calcita. El F^- presenta también una alta correlación estadísticamente significativa con el As (r=0,92, valor p 0,01) y una distribución espacial similar. Los valores más altos de ambos iones se encuentran en el sector occidental, sobre la Paleosuperficie relíctica principal (Unidad 1.a), vinculados con aguas sódicas y de mayor pH (entre 7,97 y 8,25). El análisis multivariado de componentes principales (ACP) permitió resumir todos los datos y la información en un conjunto más pequeño de factores o componentes. La matriz de componentes rotados puede observarse en la Tabla II, mientras que los componentes principales se detallan en la Fig. 9. Los tres

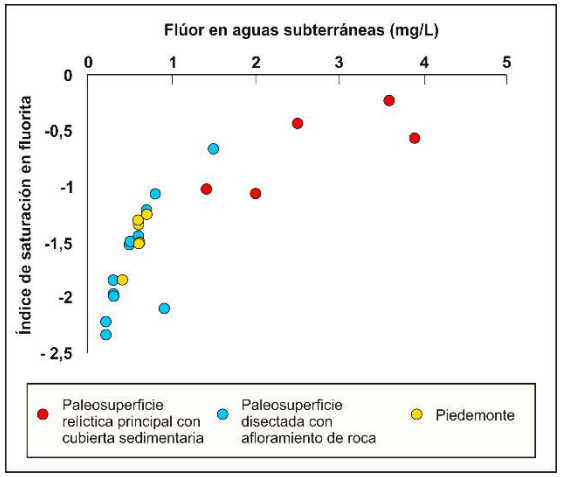


Fig. 7: Índice de saturación de fluorita vs contenido de F^- en aguas subterráneas.

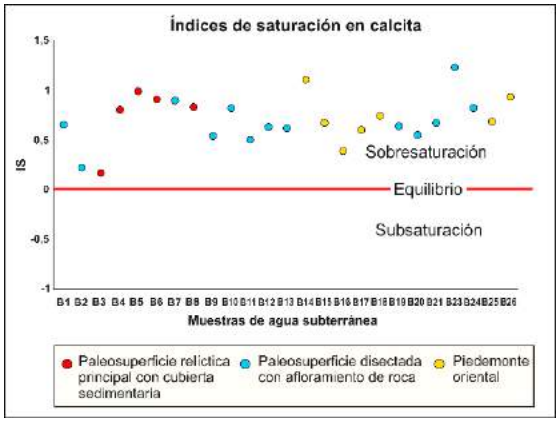


Fig. 8: Índices de saturación de calcita

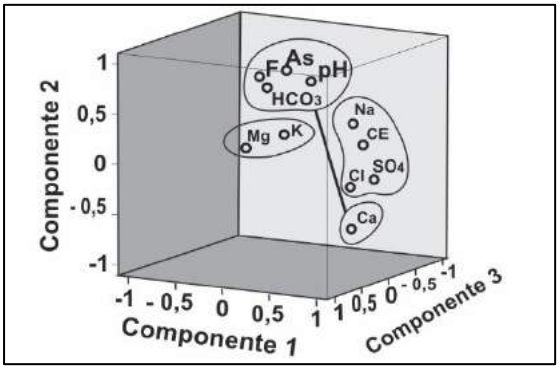


Fig. 9: Componentes principales obtenidos mediante el análisis estadístico multivariado.

Tabla II: Matriz de componentes rotados.

	Componentes		
	1	2	3
pH	,312	,787	,028
CE	,943	,239	,146
HCO3	-,070	,711	,167
SO4	,965	-,121	,006
Cl	,849	-,171	,0226
Na	,844	,451	,178
K	,384	,380	,651
Ca	,538	-7,26	-3,24
Mg	,144	,262	,890
As	,168	,918	,231
F	-,044	,847	,331

factores identificados por el ACP explican el 83,5 % de la varianza acumulada. Cada uno de ellos brinda una aproximación a los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la cuenca de estudio. En términos generales, el CP 1 y el CP 2 reflejan un porcentaje de varianza similar (34,8 % y 33,9 %, respectivamente), que son considerablemente superiores a los obtenidos para el CP 3 (14,7 %). Como puede verse en la Tabla II y en la Fig. 9, la matriz del Factor 1 indica una fuerte correlación positiva de CE, SO_4^{2-}, Cl^- y Na^+. Esto se interpretó como el factor de "salinidad del agua", atribuido principalmente a la interacción agua-sedimento, demostrando que cuanto más salada es el agua, más SO_4^{2-} y Cl^- contiene. El Factor 2 exhibió una correlación positiva, de fuerte a moderada, entre HCO_3^-, As, F^- y pH, todas ellas opuestas a Ca^{2+}. Este factor explica la geoquímica de los elementos traza en esta cuenca, es decir, la estabilidad de As y F^- en solución bajo condiciones de aguas bicarbonatadas sódicas y de elevado pH. El Factor 3 explica una parte menor de la varianza y está representado por las variables químicas Mg^{2+} y K^+, que pueden originarse en bajas concentraciones por la meteorización de los minerales.

CONCLUSIONES

En la cuenca del arroyo Las Peñas, ubicada en las Sierras Pampeanas de Córdoba, el acuífero freático se desarrolla tanto en depósitos sedimentarios como en las rocas fracturadas del basamento. De acuerdo a la red de flujo de aguas subterráneas obtenida, la distribución espacial de los valores de CE y los tipos geoquímicos del agua es posible destacar que, tanto la dinámica de las aguas como los aspectos químicos, están vinculados a los ambientes geomorfológicos más importantes: una paleosuperficie relíctica con cubierta sedimentaria, una paleosuperficie rocosa disectada con valles intermontanos y el piedemonte sedimentario. Tanto el relieve como la presencia de sedimentos en cada unidad (espesor, textura y mineralogía) controlan el flujo y la química de las aguas subterráneas. Así, las aguas bicarbonatadas sódicas con mayor contenido salino dominan en aquellas zonas más llanas, donde la cubierta sedimentaria de granulometría más fina permite un mayor contacto agua-mineral.

En relación con los valores de F^- presentes en las aguas subterráneas (0,2 a 3,9 mg/L), es evidente que también fueron controlados por las características geomorfológicas y litológicas principales de la cuenca, que a su vez controlan la dinámica de las aguas subterráneas. Los valores más elevados se encontraron en las zonas donde predominan las capas sedimentarias loéssicas, especialmente en la Paleosuperficie relíctica principal. Los valores más bajos, por su parte, aparecen en el entorno rocoso central, donde el agua subterránea fluye más rápidamente y el contacto agua-roca es menor. Dos minerales comunes en esta cuenca, como la fluorita y la apatita, que se consideran comúnmente responsables del suministro de F^- a las aguas subterráneas, se han tenido en cuenta para evaluar el origen de este elemento mediante relaciones molares. Sin embargo, sólo unas pocas muestras de aguas subterráneas, pertenecientes a la Unidad 1.a, se encontraron cerca de la línea de disolución de la apatita. Esta aproximación no es suficiente para definir a este mineral ni a la fluorita como los principales contribuyentes de F^- a las aguas subterráneas de la cuenca, por lo que se estima que los fluoruros provienen de otra fuente.

De esta manera, y teniendo en cuenta que los valores más altos se localizan en el entorno loéssico de la Unidad 1.a y en menor medida en el piedemonte oriental, puede suponerse que el abundante vidrio volcánico, conocido portador de F^-, es la fuente más probable de este elemento químico. Asimismo, no sólo resulta necesario interpretar la posible fuente sino también el entorno geoquímico específico que favorece la transferencia de elementos químicos de los minerales a las aguas subterráneas. De esta manera, los resultados obtenidos a partir del tratamiento estadístico de datos, incluido el análisis multivariado, demostraron que los altos contenidos de F^- disuelto, de muy buena correlación con los elevados valores de As, son estables en aguas bicarbonatadas sódicas y de alto pH.
Por lo expuesto, serán necesarios futuros estudios y ensayos de laboratorio para confirmar el papel del vidrio volcánico y de los diferentes minerales en la composición química de las aguas subterráneas y la relación existente con los procesos de desorción de los minerales de óxido presentes en los sedimentos.

REFERENCIAS

Amini, M., Mueller, K., Abbaspour, K. C., Rosenberg, T., Afyuni, M., Møller, K. N., Sarr, M. & Johnson, C. A. Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental science & technology*. *42*(10), 3662-3668 (2008).

APHA (American Public Health Association). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington (2005).

Armienta, M. A., and Segovia, N. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental, Geochem, Health*, 30(4), 345-353 (2008).

Ayerza, A. Arsenicismo regional endémico (keratodermia y melanodermia combinadas). *Boletín de la Academia de Medicina*. 2(3), 1917, 11-24 (1917).

Bécher Quinodóz, F., Maldonado, L., Blarasin M., Matteoda, E., Lutri, V., Cabrera, A., Giuliano Albo, J. & Giacobone, D. The development of a conceptual model for arsenic mobilization in a fluvio-eolian aquifer using geochemical and statistical methods. *Environmental Earth Sciences*. 78: 206, https://doi,org/10,1007/s12665-019-8201-8 (2019).

Blarasin M., Cabrera, A., Hildmman, F., Matteoda E., Becher Quinodoz F., Giuliano Albo, J. & Maldonado, L. Fluorides in the phreatic aquifer of the loess plain, Córdoba, Arg. *Journal of Environmental Hydrology*, Ed: AIEH International Association of Environmental Hydrology. Vol,19 n°17, p1 - 10, ISSN 1058-3912 (2011).

Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Aguirre, M., Giuliano Albo, J., Bécher Quinodóz, F., Maldonado, L., y Frontera, H. Recursos hídricos subterráneos Parte II: Aspectos geoquímicos, isotópicos, contaminación y aptitudes de uso. En: Roberto D. Martino y Alina B. Guereschi (Eds.). *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba*. Asociación Geológica Argentina, Córdoba (2014).

Blarasin, M., Bécher Quinodóz, F., Cabrera, A., Matteoda, E., & Felizzia, J. Arsenic and Fluoride in Groundwater of a Loessical Unconfined Aquifer, Cordoba, Argentina, *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*. Volume 4, Issue 5 Ver, III, pp 59-65 e-ISSN: 2321–0990, p-ISSN: 2321–0982 (2016).

Bonalumi, A., Martino, R., Sfragulla, J.A., Carignano, C. & Tauber, A. Hoja Geológica 3363-I Villa María, Provincia de Córdoba, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Buenos Aires (2005).

Cabrera, A., Blarasin, M., Dapeña, C. y Maldonado, L. Composición físicoquímica e isotópica de precipitaciones del sur de Córdoba, Estación Río Cuarto, Red Nacional de Colectores, Argentina. *Temas Actuales Hidrología Subterránea*, Gonzalez, Kruse, Trovatto & Laurencena (Eds.) Ed. Edulp, pp, 35-42 (2013).

Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni S., Cioccale, M. Geomorfología. En: Roberto D. Martino y Alina B. Guereschi (Eds.), *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino:*

Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Asociación Geológica Argentina, Córdoba, pp 747–822 (2014).

Cronin, S. J., Neall, V. E., Lecointre, J. A., Hedley, M. J., & Loganathan, P. Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(3-4), 271-291 (2003).

Degiovanni, S. *Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del arroyo Achiras-del Gato, como base para su gestión sustentable*, Tesis Doctoral (Inédito) Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina (2008).

García, M. G., Lecomte, K. L., Stupar, Y., Formica, S. M., Barrionuevo, M., Vesco, M., Gallará, R. & Ponce, R. Geochemistry and health aspects of F-rich mountainous streams and groundwaters from sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, *65*(2), 535-545 (2012).

Gout, R., Oelkers, E. H., Schott, J., & Wick, A. The surface chemistry and structure of acid-leached albite: New insights on the dissolution mechanism of the alkali feldspars, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(14), 3013-3018 (1997).

Goyenechea, M. Sobre la nueva enfermedad descubierta en Bell Ville. *Revista Médica de Rosario.* 7, 485 (1917).

Matteoda, E.M. *Evaluación hidrodinámica e hidrogeoquímica de la cuenca del arroyo El Barreal para establecer línea de base ambiental, con énfasis en la geoquímica del cromo*. Tesis Doctoral (Inédito) Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba, Argentina. 397 p (2012).

Matteoda E. y Blarasin, M. Fondo natural de cadmio en aguas subterráneas de un acuífero libre y vinculación con los usos del territorio, Córdoba, Argentina, En "*Agua Subterránea Recurso Estratégico*", II 70-77, Gonzalez et al. eds. Ed. EDULP ISBN 978-987-1985-03-6 (2013).

Matteoda E., Blarasin, M., Lutri, V., Giacobone, D., Maldonado, L., Becher Quinodoz, F., Giuliano Albo, J. and Cabrera, A. Uranium in Groundwater in The Sedimentary Aquifer of The Eastern Sector of Valle De La Cruz, Córdoba, Argentina. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)* ISSN: 2394-3661, Volume-6, Issue-7 (2019).

Nicolli, H., Suriano, M., Gómez Peral, L., Ferpozzi and Balean, O. Groundwater contamination with Arsenic and other trace elements in an area of the province of Córdoba, Argentina, *Environmental Geology and Water Sciences*, 14 (1), 3-16 (1989).

Nicolli, H. B., Bundschuh, J., Blanco, M., Tujchneider, O. C., Panarello, H. O., Dapeña, C., & Rusansky, J. E. Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: results from 100 years of research. *Science of the Total Environment*, *429*, 36-56 (2012).

Parkhurst, D. L. y Appelo, C.A. User's Guide to PHREEQC (version 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: *US Geological Survey Water-Resources Investigations Report*: 99-4259, 312 p. (1999).

Prámparo S. *Características geomorfológicas de la cuenca alta-media del arroyo Las Peñas y su relación con la potencialidad hidrogelógica. Provincia de Córdoba, Argentina.* Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédita. (2020).

Smedley, P. L., Nicolli, H. B., Barros, A. J., & Tullio, J. O. *Origin and mobility of arsenic in groundwater from the Pampean Plain, Argentina*, pp, 275-278 (1998).

Smedley, P.D., Macdonald, H. Nicolli, A. Barros, J. Tullio and J. Pearce. *Arsenic and other quality problems in groundwater from Northern La Pampa province, Arg. Nottingham*, TR WC/99/36, British Geological Survey (2000).

SPSS Statistics version 21. *Chicago, Illinois USA* (2012).

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*, World Program for Evaluation of Hydric Resources. ISBN:978-92-3-300108-4, 198p (2019).

Viero, A. P., Roisenberg, C., Roisenberg, A., & Vigo, A. The origin of fluoride in the granitic aquifer of Porto Alegre, Southern Brazil. *Environmental geology*, *56*(8), 1707 (2009).

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS EN CONDICIONES CLIMÁTICAS VARIABLES

Principiano L.[a], Álvarez O. G.[b] y Fuentes N. O.[cd]

[a] *Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA.*
[b] *Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA.*
[c] *Departamento ICES, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, CAC, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA.*
[d] *Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sabato", Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA.*

e-mail: luciaprincipiano@gmail.com

RESUMEN

La tomografía de resistividad eléctrica es un método simple y no destructivo que permite estudiar el comportamiento de suelos mediante un mapeo de resistividad en una sección del mismo. El estudio del comportamiento eléctrico se realizó utilizando un equipo económico, seguro y fácil de operar. El equipo, con certificación ISO 9001, es un medidor de tensión / resistencia de tres cables, con un rango de resistencia de 0-20Ω/ 0-200Ω/ 0-2000Ω; y un rango de tensión de 0-200 Vac (40-500Hz). Durante tres semanas se han realizado mediciones de resistividad eléctrica y temperatura de distintos suelos. Los suelos estudiados se encuentran en la Región Pampeana, particularmente en la Pampa Húmeda y, más específicamente, en la Pampa Ondulada que comprende a todo el NE de la Provincia de Buenos Aires. Las mediciones de suelos desnudos y suelos con cobertura vegetal, se han realizado en extensión (longitud de observación de 1m) y profundidad hasta 0.25m, con un desplazamiento equiespaciado de los electrodos. Para cada suelo, se han repetido las series de mediciones en distintas condiciones climáticas: días soleados con humedad inferior a 40% y temperaturas de 38ºC; días nublados y ventosos; después de una lluvia; y días soleados con temperaturas inferiores a 27ºC. Para cada muestreo, se elaboraron mapas de temperatura y resistividad eléctrica, observándose una uniformidad de los resultados de resistividad en cada estrato de una determinada profundidad. Se verificó una menor resistividad en el terreno sin cobertura y en el terreno humedecido luego de las precipitaciones. La homogeneidad de los valores registrados de temperatura y resistividad, aumentó luego de la infiltración del agua, obteniéndose para ambos casos valores más uniformes, pudiéndose registrar el recorrido del agua a través de los canales naturales del suelo. A partir del trabajo realizado se puede concluir que esta técnica es útil para el estudio de suelos en diferentes condiciones climáticas.

Palabras Claves: Suelos, Resistividad eléctrica, Variación climática, Lluvias, Infiltración.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad ambiental se alcanza con el mantenimiento y el mejoramiento de la calidad del suelo. Esta se puede medir a partir de parámetros físicos, químicos y biológicos. Algunos de estos son la infiltración, la compactación y la porosidad del suelo, entre otras cosas. Para caracterizar estas propiedades existen distintos métodos, los cuales pueden ser destructivos o no destructivos. En este trabajo se utilizó el método de tomografía de resistividad eléctrica, el cual es no destructivo.

La resistencia (R) de un material tiene dos componentes principales: el intrínseco, que caracteriza al medio expresado como la resistividad (δ) de este y el geométrico, el cual tiene en cuenta las dimensiones de la muestra, ver Ec. (1). La resistividad es la capacidad específica del material para oponerse al movimiento de los portadores de carga. Un material, cuando es menos conductor, se opone en mayor medida al transporte de cargas. A medida que aumenta el área que ofrece el conductor, incrementa la resistividad del mismo, mientras que su largo tiene el efecto opuesto.

$$\delta = R\frac{A}{L} \qquad Ec.\,1$$

Observando la variación de la resistividad, se pueden distinguir los distintos estratos que han sido formados en el suelo por mecanismos naturales. Es posible realizar un mapa de resistividad del subsuelo de una sección del terreno. Además, con este método, se pueden revelar las redes de poros que permiten la conectividad hidráulica. El objetivo es describir la infiltración del agua y la composición abiótica de los distintos estratos del suelo mediante la tomografía de resistividad eléctrica y variación térmica.

Para comparar los resultados de resistividad obtenidos con valores de referencia, se estudió el tipo de suelo sobre el cual se realizó el experimento. Los suelos dominantes que se encuentran en la provincia de Buenos Aires son los Molisoles, Alfisoles, y en menor proporción, Vertisoles. Los Molisoles pampeanos provienen de material loéssico y tienen una granulometría limosa. Estos suelos contienen una alta proporción de materiales finos, variando el porcentaje de arcilla, limo y arena. Se denominan franco limosos; conteniendo aproximadamente un 80% de limo, entre un 20% y 30% de arcilla, y en menor proporción granos de arena. Esta se la considera una tierra fértil, con un porcentaje de materia orgánica entre un 2% y un 4%. En el artículo de Agrahari, S y Mohamed I., 2009, se determinó que las formaciones de arcilla presentan una resistividad menor que 10 Ωm, mientras que el limo presenta valores que varían entre 5-20 Ωm. En el trabajo de Rodríguez L. S., 2016, realizado en toda la provincia de Buenos Aires, se graficó un mapa de resistividad a 1 metro de profundidad, con resistividades de 5-10 Ωm y 10-20 Ωm. El error que se predijo para estos valores fue entre 0-5 Ωm.

También, otros estudios edáficos revelaron un fenómeno que puede suceder en un suelo típico de la pampa ondulada, llamado Argiudol vértico. Este deriva de la contracción y expansión del suelo y se conoce como pedoturbación. Durante estaciones secas se tienden a formar grietas donde cae material superficial. En la etapa de rehumedecimiento del suelo, estas grietas se cierran por expansión de la arcilla y el espacio de las grietas es insuficiente para su expansión. La presión de hinchamiento se libera por desplazamientos oblicuos y ascendentes del material del suelo, el cual se acomoda horizontalmente. Se genera así una débil horizontación, ya que en dirección vertical la expansión es resistida por el peso del suelo.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en Villa Maipú, provincia de Buenos Aires (34°34’22.7”S; 58°30’47.9”W) en el mes de febrero de 2020. El trabajo se llevó a cabo en dos locaciones cercanas a un edificio del Centro Atómico de Constituyentes.

La primera zona de muestreo (zona A) fue a unos pocos metros de distancia de la edificación. El segundo lugar de muestreo (zona B) fue con mayor separación de la construcción.

El terreno estaba constituido superficialmente por césped. El muestreo de la zona A se realizó en un sector con poca cobertura vegetal, por lo menos hasta los 50 cm de longitud. Había sombra hasta el mediodía, lo que reducía la temperatura del sector. En cambio en la totalidad de la zona B el pasto era abundante y uniforme, con una exposición solar prolongada.

Se utilizó para las mediciones un telurímetro comercial de tres cables de marca SEW modelo ST-1520 fabricado en Corea. El equipo provee una corriente de 2mA a una frecuencia de 820 Hz a través de un inversor cuya fuente de voltaje es un grupo de seis baterías alcalinas de 1.5 V cada una. El rango de resolución para la medida de resistencia es variable según el intervalo en que se opere el aparato, la precisión alcanzada en todos los casos es del orden de ±0.1Ω.

Para medir la resistencia con el aparato se deben colocar los tres cables. Los cables rojo y amarillo deben ir en los electrodos, y el cable verde conectado funciona como potencial de referencia.



Figura 1. Imagen 1 zona de muestreo A, imagen 2 zona de muestreo B. Se observan las separaciones máximas de los electrodos en cada zona de muestreo y los materiales utilizados.

Para el muestreo de la zona A se mantuvo fijo un electrodo y el otro se lo fue alejando del primero en línea recta, tomando 3 mediciones cada 0,1 m hasta llegar al metro. Se realizó este proceso en 4 profundidades distintas, separadas por 0,03 m. La primera profundidad fue 0,03 m, la segunda 0,06 m, la tercera a 0,09 m y la última a 0,12 m.

Se modificó el método de medición, se escogió otro lugar de muestra con cobertura vegetal uniforme, y se midió la temperatura con la misma frecuencia que la resistencia con el objetivo de obtener datos más precisos. En el muestreo de la zona B se movieron los dos electrodos a lo largo del metro, separados a una longitud constante de 10 cm. Se tomaron en cada longitud, repitiendo las mismas profundidades alcanzadas en la zona A, 10 mediciones para disminuir el error.

Se realizaron en total cuatro muestreos. El primero en la zona A y los siguientes en la zona B. Para la tercera y cuarta medición se cambiaron los electrodos con el objetivo de alcanzar profundidades de 0,2 m y 0,25 m. Se generó una cronosecuencia para realizar

un seguimiento del comportamiento eléctrico del suelo y así poder identificar posibles alteraciones del mismo.

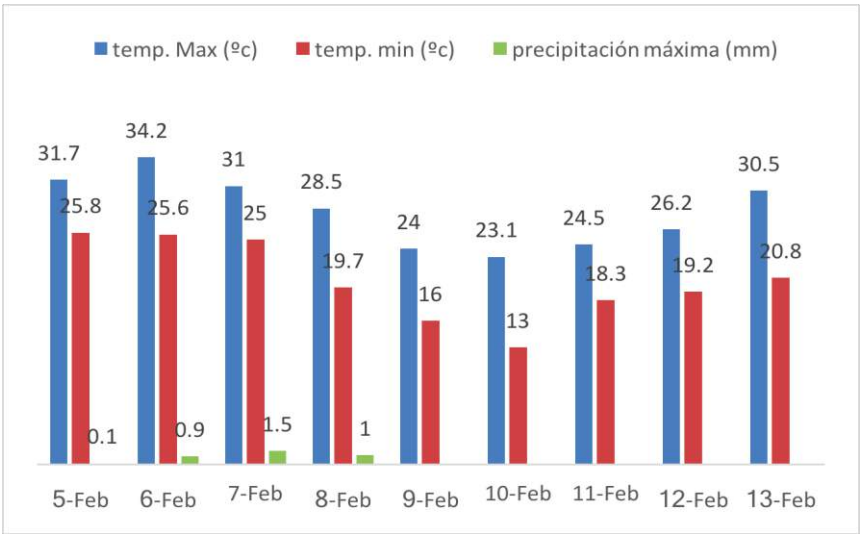


Figura 2. Gráfico con datos meteorológicos de parte de los días de febrero. Los cuatro muestreos se llevaron a cabo los días 5-Feb, 6-Feb, 10-Feb y 13-Feb.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRIMERA MEDICIÓN ZONA A

Al analizar los resultados que se obtuvieron en la zona A, se pudo calcular la resistividad del suelo en los primeros 10 cm del metro, en las 4 profundidades medidas. En esta zona, debido al método que fue utilizado, donde se mantuvo un electrodo fijo al comienzo del metro (ver Fig.1), no se pudo calcular la resistividad a través de los 100 cm de tierra. Por esta razón se compararon los valores de los primeros 10 cm de la zona A con los obtenidos en la misma longitud de la zona B. Una cobertura vegetal disminuye la evapotranspiración del suelo, manteniendo una humedad y hábitat ideal para la microbiología presente. La ausencia de vegetación aumenta la compactación del suelo, debido a la vulnerabilidad del mismo a la erosión hídrica, por ejemplo al impacto de las gotas de lluvia. La Zona B representa un suelo de mejor calidad, en comparación con la Zona A; según el trabajo de Quintero, V., 2013, la ausencia de compactación genera una oxigenación ideal y una porosidad óptima que facilita el almacenamiento de agua para cubrir las necesidades de la planta.

Estudios sobre la resistividad de un terreno comprobaron que la misma disminuye cuando la compactación es mayor. Esto se puede notar en los siguientes gráficos (ver Fig. 3 y Fig 4.). Se observó que los valores de la zona de mayor compactación son menores en las profundidades de 0,06 m, 0,09m y 0,12m. Mientras que los valores cercanos a la superficie del terreno son muy similares, alrededor de los 4Ωm. Se notó que la fluctuación en la resistividad es mayor en la zona donde había vegetación. La presencia de raíces y actividad microbiana del suelo aumenta la variación de los valores.

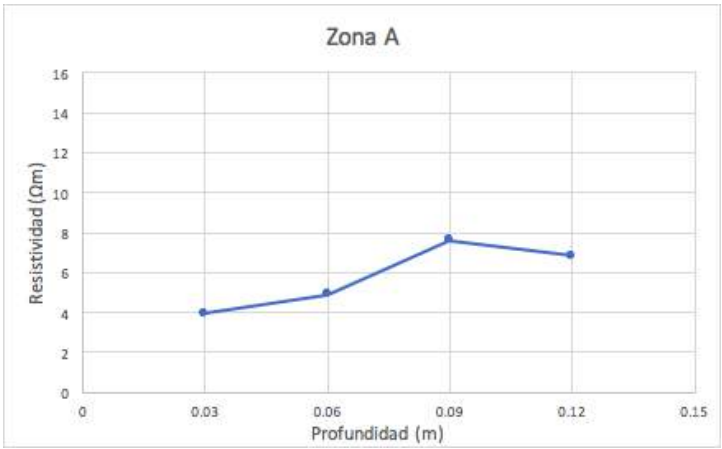


Figura 3. Valores de resistividad en función de la profundidad obtenidos el 5 de febrero en la zona A.

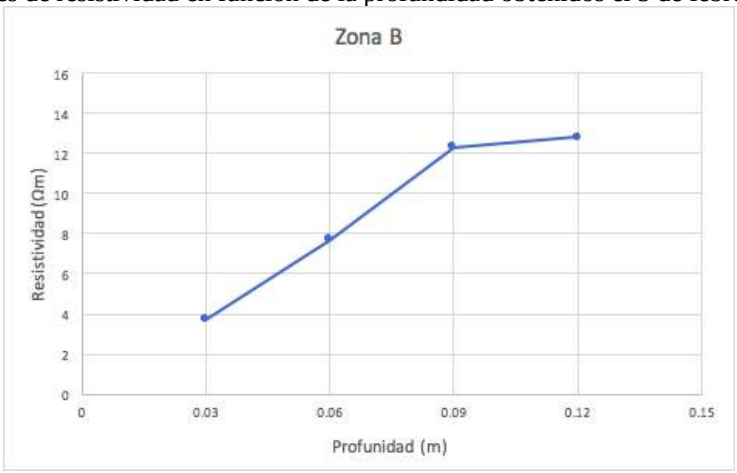


Figura 4. Valores de resistividad en función de la profundidad obtenidos el 5 de febrero en la zona B.

SEGUNDA MEDICIÓN ZONA B

Se notó que el error de los valores de resistividad disminuye en los estratos de mayor profundidad (entre 0,09 y 0,12 m) cuando se midió en los últimos 40 cm del metro. Esto quiere decir que la fluctuación disminuyó debido a una mayor uniformidad de la tierra a esas profundidades, al final del metro. Visualizando la figura 5, en aquellas profundidades, la variación ya no es tan notoria, ya que los valores son más cercanos entre sí. En los primeros 50 cm, los valores de resistividad de las 4 profundidades alcanzadas solapan entre ellas. Los valores difieren más en los últimos 50 cm del metro de tierra. Esto indica que los componentes son más homogéneos al principio del metro. Al analizar el gráfico (ver Fig. 5), a lo largo de metro y a través de las 4 profundidades, se puede ver que la variación de la resistividad entre los 0,03 y 0,06 metros de profundidad es mayor que entre los 0,09 y 0,12 metros. La gama de colores varía en los primeros estratos, mientras que permanece en los mismos tonos en los últimos. Con respecto al error de cada uno de los valores de las primeras 2 profundidades, se notó que estos casi no solapan entre sí, en algunos casos, los valores no entran dentro de la nube del error. Al no sacar testigos para analizar químicamente estos estratos, se puede decir que la diferencia se debe a la

cercanía de la primera profundidad con la cobertura vegetal y con la fauna microbiana y de insectos, lo cual puede resultar en una disminución de la resistividad en esa zona.

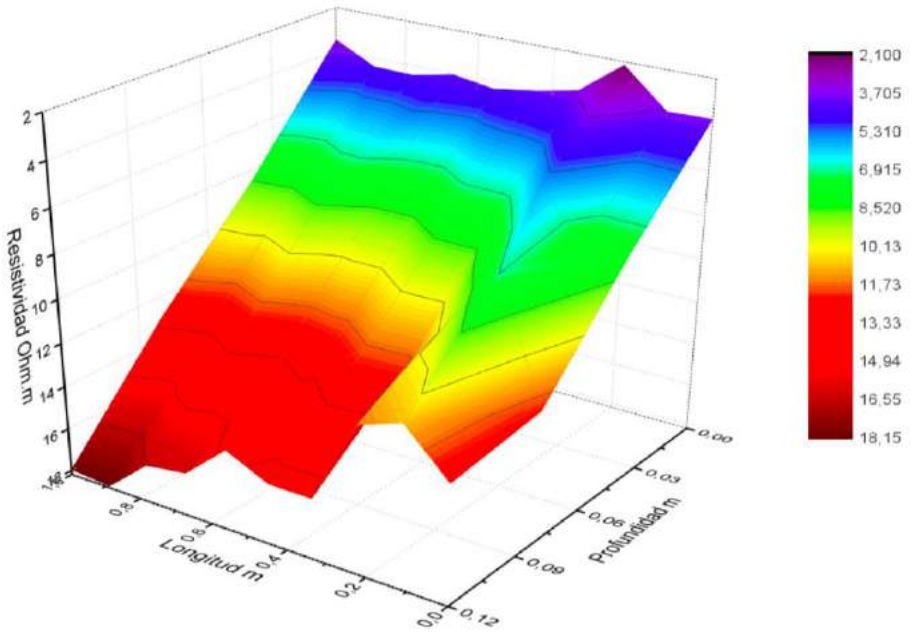


Figura 5. Valores de resistividad según profundidad y longitud, obtenidos el 6 de febrero, zona B.

Como se esperaba, los valores de resistividad en la superficie son menores y van en aumento con la profundidad. Esta relación se describió en la introducción, ver Ec.(1). La variación en la geometría (área del terreno) afecta el valor de resistividad calculado.

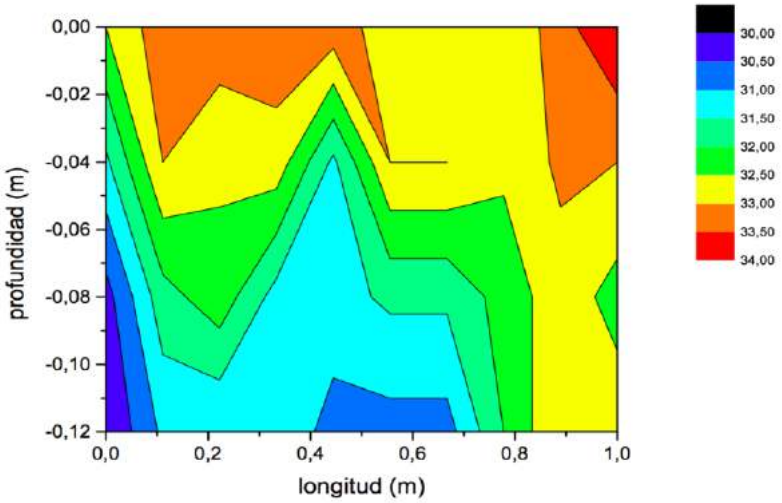


Figura 6. Temperatura en función de la profundidad y longitud. Segundo muestreo zona B (6 de feb.)

Al analizar la variación de la temperatura en la zona B (ver Fig. 6), se nota que la dispersión de colores es más pronunciada a lo largo del eje y. Este representa las diferentes profundidades, por lo cual la fluctuación de temperatura es mayor entre diferentes estratos. Al observar el mapa de resistividades (ver Fig. 7), también se nota que la

variación en los colores es más pronunciada a lo largo del eje de profundidad. En esta, casi no se observan variaciones en una misma profundidad, salvo alrededor de los 30 cm del metro. Esto demuestra la tendencia de la tierra de formar capas, de distintos grosores, que difieren en su composición.

En el estrato de la superficie, se observan colores más cálidos, debido a la elevada temperatura ambiente, que rodeaba los 38º C (ver Fig. 6). A partir de la segunda profundidad predominan los colores que representan una temperatura menor, como por ejemplo el azul, celeste y verde. Lo cual puede explicar que los valores de resistividad de los primeros 2 estratos no solapen entre sí. Se puede visualizar que al final del metro, a partir de la segunda profundidad, el color se mantiene constante, predominando el amarillo; esto se relaciona con lo mencionado sobre la disminución del error de los valores de los últimos 2 estratos. En el mapa de resistividad (ver Fig. 5) se ve que, en los estratos mencionados, predomina el color rojo. Este color indica altos valores de resistividad. Al comparar con el gráfico de la figura 6, al acercarnos a esta ubicación el color cambia a amarillo, representando un aumento de la temperatura.

TERCERA MEDICIÓN ZONA B

Los valores de resistividad y temperatura obtenidos el lunes 10 de febrero, son útiles para estudiar anomalías o variaciones del terreno, que pueden estar vinculadas a cambios en el clima. Se compararon los valores obtenidos sólo para las primeras 4 profundidades, que fueron las analizadas antes de la lluvia. En la figura 9, en contraste con la superficie de la figura 7, se puede ver que la resistividad de la zona B disminuyó. El color violeta, que indica los valores mínimos de resistividad, se extendió en el primer y segundo estrato. La humedad del suelo generó una mayor compactación, eliminando los poros con aire, que generaban una mayor resistividad a la corriente.

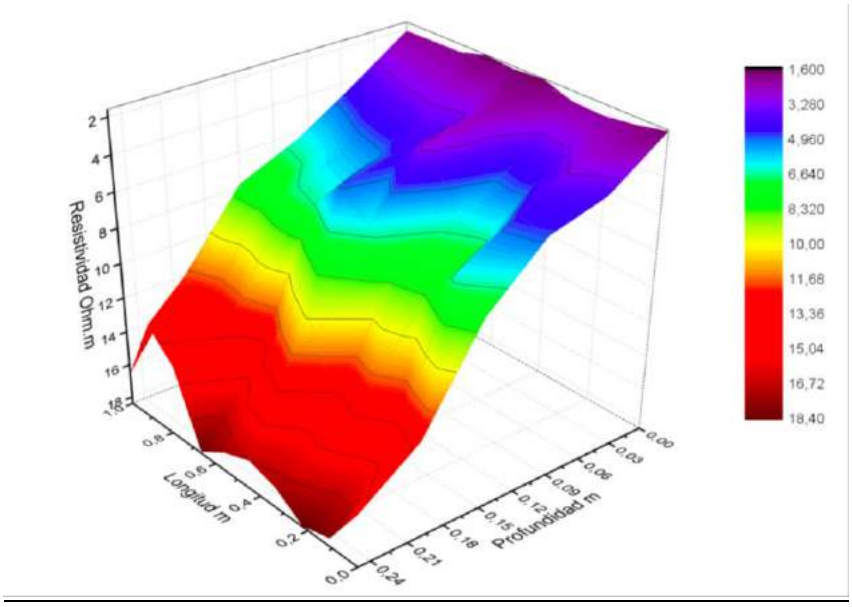


Figura 7. Valores de resistividad según la profundidad y la longitud, obtenidos el 10 de febrero en la zona B.

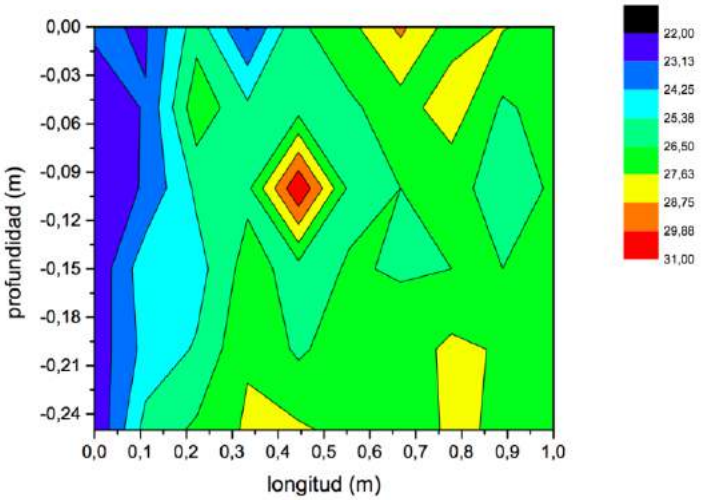


Figura 8. Temperatura según profundidad y longitud. Tercer muestreo zona B (10 de feb.).

En comparación a los resultados del 6 de febrero, no se visualizó una disminución del error propagado en los últimos 30 cm del metro, en los estratos de 0,09 m y 0,12 m de profundidad. Se detectó infiltración, esta puede haber alcanzado los 0,12 m de profundidad; por lo cual, en general, el error de los valores de resistividad disminuyeron con respecto a los colectados en la fecha anterior a la precipitación. Se puede deber al efecto causado en el suelo por la lluvia los días anteriores a medir.

Se notó un aumento de la fluctuación de las resistividades en los cuatro estratos a través del metro, longitudinalmente (ver Fig.7). Al comparar la figura 8 con la medición anterior de temperatura, se notó una mayor fluctuación de los valores en el eje X (longitud) que en el eje vertical que representa profundidad. Además, los valores de temperatura fueron menores, la gama de colores presenta menor calidez (ver Fig.8). Para las profundidades de 0,20 y 0,25 metros, en ambos gráficos, de resistividad y temperatura, la gama de color se hace más pareja.

Se sigue notando una mayor separación de los valores de resistividad en las primeras 4 profundidades en los últimos 30 cm del metro. Esto podría indicar que la composición química en esta parte de la muestra es menos homogénea, aún luego de la lluvia. En el mapa de superficie (ver Fig.7), en la zona próxima a los 100 cm, se nota un color específico para cada profundidad. Asimismo, en el de temperatura (ver Fig. 8), en esta misma ubicación, la fluctuación en el eje horizontal disminuye.

Por otro lado, en comparación a las primeras medidas, se notó un mayor solapamiento de los valores más cercanos a la superficie, entre los 0,03 y 0,06 metros de profundidad. En el mapa de resistividad de la medición anterior (ver Fig.5) se notaban valores de resistividad que no solapan entre sí, se distinguía un distinto color entre los dos estratos. Esto puede significar que la tierra se volvió más uniforme en estas primeras profundidades por acción del agua.

En estos valores, con respecto al aumento de la resistividad a mayor profundidad, se identificó un incremento más lineal en los últimos 30 cm del metro de muestra. Cuando se alcanzan los 0,2 y 0,25 metros de profundidad, en donde no necesariamente se ve un

incremento lineal de los valores, la pendiente varía con respecto a la de las primeras 4 profundidades

Se puede ver (Fig.6 y Fig.8), que en la zona más profunda, la temperatura es más elevada en la cercanía de los 100 cm de la muestra**.** Sin embargo, se observó un contraste entre las resistividades correspondientes de ambos muestreos. En la figura 7, la resistividad es menor a esa longitud que en los centímetros anteriores, mientras que, en la figura de la fecha anterior a la lluvia, se notó un aumento de este valor. La diferencia en el comportamiento eléctrico se debe a la presencia del agua. Este fluido tiene la tendencia de disminuir su resistividad dado un aumento en la temperatura.

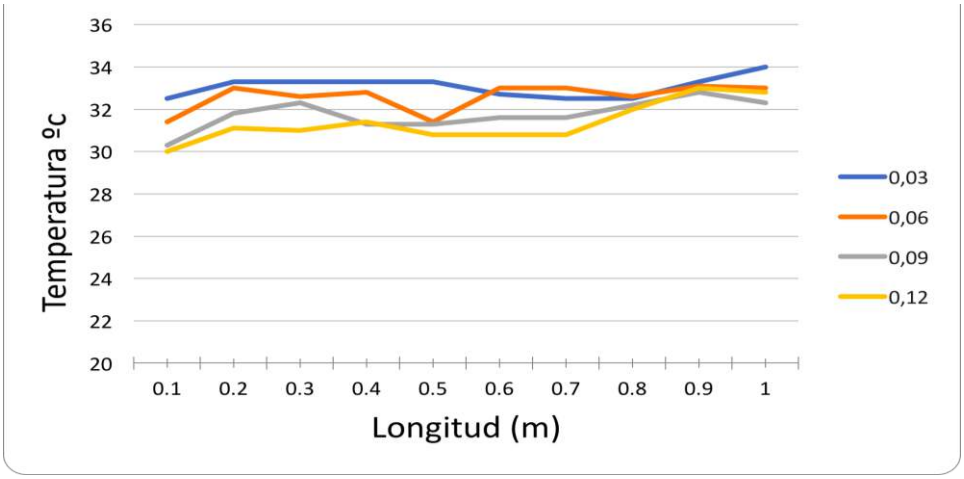


Figura 9. Variación de temperatura en función de la longitud, para cada profundidad alcanzada, el 6 de febrero en Zona B.

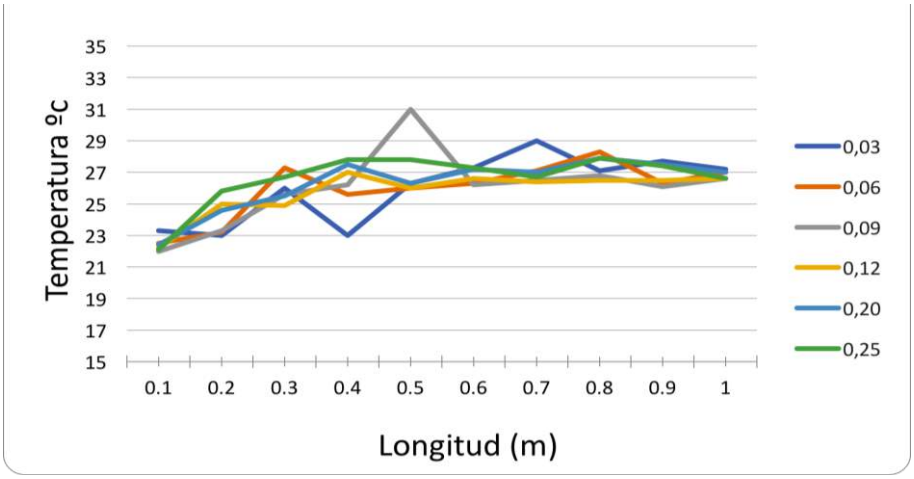


Figura 10. Variación de temperatura en función de la longitud, para cada profundidad alcanzada, el 10 de febrero en Zona B.

Se puede visualizar el aumento en la variación de los valores en la dirección horizontal (ver Fig. 9 y Fig.10). Se compararon ambos gráficos, en el segundo (ver Fig.10) se puede notar que las rectas se encuentran más cercanas entre sí, casi todos los valores de temperatura solapan. Sin embargo, las líneas fluctúan más que las correspondientes a la fecha anterior a la lluvia, principalmente en los primeros 50 cm.

CUARTA MEDICIÓN ZONA B

En la última medición se notó una mayor uniformidad de la resistividad en las capas de la tierra (ver Fig.11). La resistividad aumentó, pero no alcanzó los valores de la medición anterior a las precipitaciones. Puede haber sucedido el arrastre de electrolitos por el agua que fue infiltrando, estos pueden ser metálicos, por lo cual su ausencia aumenta la resistividad de los estratos. Los valores de resistividad y temperatura de las últimas dos profundidades varían menos que la de los estratos subyacentes (ver Fig.12).

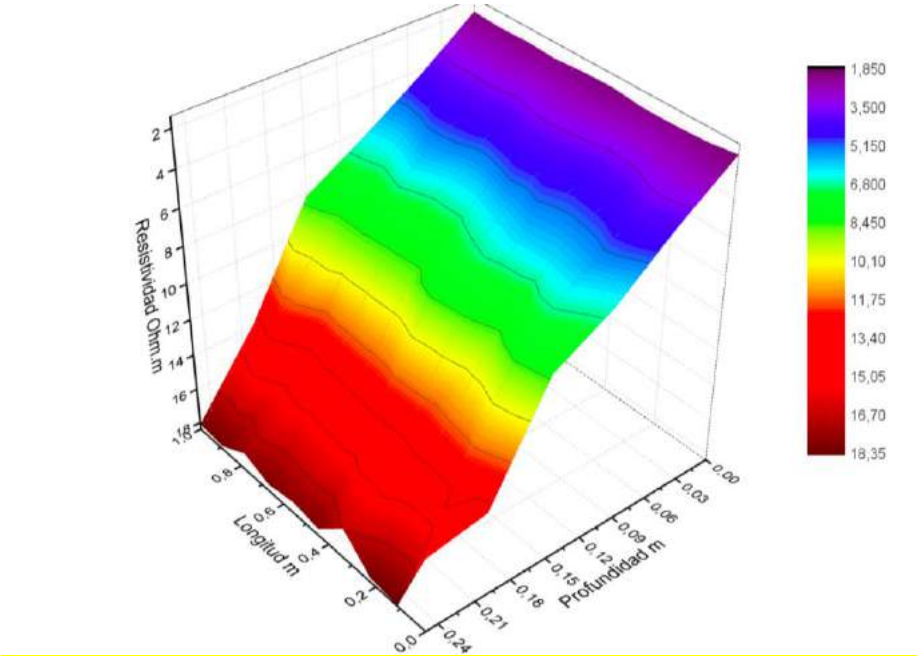


Figura 11. Variación de la resistividad según la profundidad y la longitud, en la Zona B (13 de feb.)

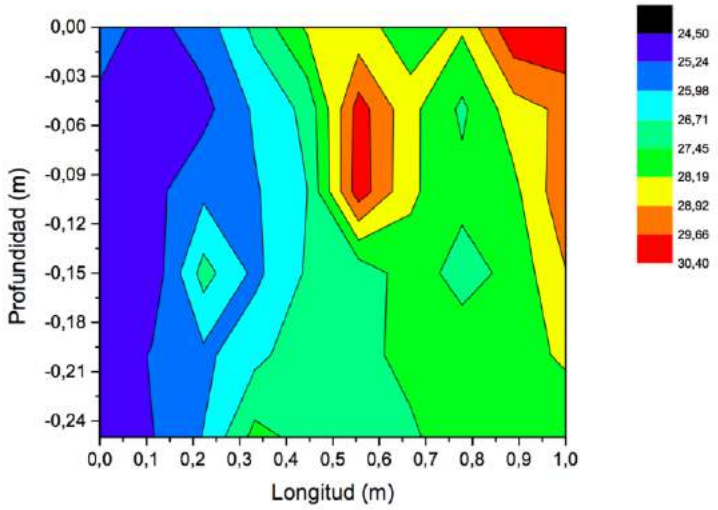


Figura 12. Variación de la temperatura según la profundidad y la longitud. Cuarto muestreo zona B (13 de feb.)

Estas figuras representan los valores que se obtuvieron 4 días después de la lluvia. Con respecto a las primeras 4 profundidades se vio que el error de estos valores se

mantuvo constante a lo largo del metro, comparado con el de los obtenidos en la tercera medición. La fluctuación no parece haber aumentado ni disminuido. Sí se notó una disminución en el error de las medidas obtenidas en los 0,20 metros de profundidad. Entonces se identificó infiltración de agua contenida en los estratos superiores, la cual humedeció las capas de tierra más profundas, y provocó una homogeneización mayor luego del período de 4 días sin precipitación. La temperatura bajó en los 0,20 y 0,25 metros comparado con los valores del lunes reciente a la lluvia, en los primeros 70 centímetros del metro (ver Fig.12). Aun así, aumentó la resistividad, esto puede deberse, como fue explicado para los valores del 10 de febrero, a la presencia del agua.

La uniformidad se notó a lo largo de todo el metro. En comparación con los valores del lunes posterior a la lluvia, se notó una relación más lineal en el aumento de la resistividad por el aumento en profundidad a lo largo de los 100 centímetros de tierra. La manera en la que infiltra el agua depende de los canales que estén disponibles en la tierra, los cuales pueden variar horizontalmente, a lo largo del metro en una misma profundidad. Por eso se puede explicar por qué la relación era más lineal al final del metro de tierra y, en contraste, que haya tardado 4 días en notarse esta linealidad en los primeros centímetros.

Al comparar la figura 12 con el mapa de temperaturas de la tercera medición (ver Fig.8) se observó que la infiltración fue mayor en los últimos 30 centímetros del metro. El aumento en la temperatura 4 días después se notó en esta longitud, hasta los 0,20 metros de profundidad. El agua que ya había infiltrado comenzó a evaporarse y la zona se secó. En contraste, en los primeros centímetros, los colores representan una disminución de la temperatura (ver Fig.12). La diferencia de comportamiento se debe al paso del agua, que sigue los canales naturales del terreno, que no son precisamente verticales ni uniformes.

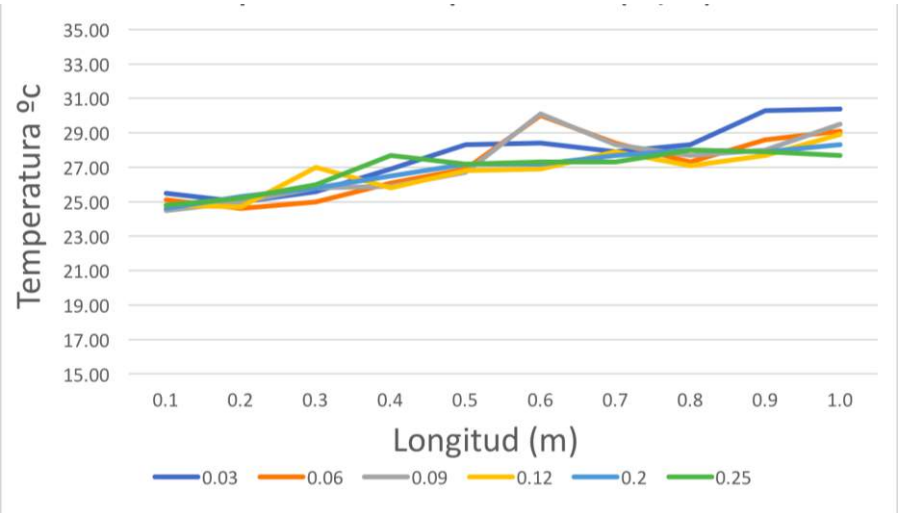


Figura 13. Temperatura en función de la longitud, a cada profundidad alcanzada, el 13 de febrero, en la zona B.

Con respecto al gráfico de línea (ver Fig. 13), al compararlo con el de las figuras 9 y 10, en este la variación disminuyó ya que el agua terminó de infiltrar en los primeros 50 centímetros del metro. Se nota un mayor solapamiento de las líneas.

CONCLUSIONES

Se pudo demostrar que la tomografía de resistividad eléctrica es un buen método para medir la infiltración del agua ya que en los distintos muestreos se pudo observar cómo era el recorrido del agua y cómo iba penetrando en las diferentes capas a medida que pasaron los días. También, con el método se logra diferenciar las capas del suelo.

Luego de analizar los resultados del experimento se concluyó que el secado del suelo húmedo es un proceso más uniforme que el de humedecimiento. Luego del período sin lluvia, los datos presentaron una menor fluctuación en cada estrato.

Las actuales investigaciones se completarán determinando los componentes del suelo. Para poder describir los componentes de cada capa es necesario realizar más estudios en diversos ambientes determinando la resistividad en cada tipo de suelo, esto en conjunto con análisis químicos para saber la composición porcentual de cada componente y tabular los resultados.

Es preciso evaluar otros factores que también puedan incidir en las mediciones. Tales como la humedad, la presión atmosférica, la radiación solar, el ph de la tierra, y otros factores que se puedan presentar. También es necesario hacer más repeticiones de las distintas formas de realizar el muestreo que fueron descritas, para comparar la eficacia de cada metodología.

Este método es muy fácil de utilizar, accesible y rápido de obtener los resultados. Es ideal para estudiar, ante situaciones de emergencias, fluctuaciones en los suelos. Por ejemplo, los derrames de contaminantes, ya que se puede determinar las anomalías en las fluctuaciones de la resistividad causadas por la sustancia y aislar el área rápidamente, sin tener que recurrir a exámenes químicos que pueden demorar más tiempo.

REFERENCIAS

Rodríguez L. S., Modelado de Resistividad y pH de la provincia de Buenos Aires: Capitalización del conocimiento del suelo y contribución al desarrollo del sector de la protección anticorrosiva de la república argentina, Universidad Nacional Lomas de Zamora (2016)

Agrahari, S y Mohamed I.,Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. Article in Journal of Applied Geophysics 67(1):74-79 · January 2009)

Quintero, V. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. Colombia Forestal (2013)

Maggi, A. y Kraemer, F. Physical and chemical characterisation of a vertic arguidoll affected by rill and interrill erosion in the rolling pampa (2016)

Cosenza, A. y Andrade, E. Caracterización del suelo y modelado de estructuras en mapas de resistividad en sitios arqueológicos. Universidad de San Carlos dCJIe Guatemala (2008)

IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA "BRISA DE MAR Y TIERRA" EN EL RÍO DE LA PLATA

Queirel J. M.[a] *y* Berri G. J.[ab]

[a] *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*

e-mail: juanma.queirel@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan resultados preliminares de un estudio realizado en la región del Río de La Plata para identificar los días en que se desarrolla una circulación local en capas bajas conocida con el nombre de "brisa de mar y tierra", que surge por el contraste térmico entre la superficie del agua y la superficie continental. Para ello se utilizan observaciones meteorológicas horarias correspondientes a las estaciones de Carrasco y Colonia en Uruguay; Aeroparque, La Plata y Punta Indio en Argentina. El período analizado comprende los días entre enero de 2009 y julio de 2017. Para la identificación de los días se emplea un método que tiene en cuenta los cambios a lo largo del día del viento y la temperatura, además de las condiciones regionales y la temperatura del agua. Este estudio arroja como resultado un conjunto de días de brisa en cada estación con un ciclo anual bien marcado, con máximo en el verano y mínimo en el invierno, ya que durante el verano la diferencia térmica entre el agua y la tierra es mayor. Los resultados del método aplicado en las 5 estaciones meteorológicas muestran que la cantidad de días en los cuales se identificó el fenómeno varía entre un total de 124 y 206 en cada estación.

Palabras Clave: Río de La Plata, Brisa de Mar y Tierra, Identificación, Observaciones.

INTRODUCCIÓN

La brisa de mar es una circulación de mesoescala generalmente observada en estaciones meteorológicas cercanas a la costa, debido al ciclo diario del contraste de temperatura superficial entre la tierra y el agua. La diferencia en las capacidades caloríficas entre estas superficies da lugar a la formación de un gradiente de temperatura en niveles bajos que induce la formación de un gradiente de presión perpendicular a la costa. El aumento en la magnitud del gradiente de presión crea una componente del viento que sopla desde el agua hacia la tierra, que prevalece hasta el final de la tarde. Por la noche, la componente del viento local se invierte y se desarrolla la brisa terrestre, aunque normalmente es más débil que la brisa marina (Simpson, 1994).
Dada la geografía del Río de La Plata (ver Fig. 1), resulta interesante estudiar el fenómeno mencionado a lo largo de sus costas, tanto la argentina como la uruguaya. Ya que ambas costas están enfrentadas, el contraste térmico entre el continente y el agua generado durante el día, tiene sentido opuesto en ambos casos. Esto agrega un aspecto interesante a estudiar ya que una misma condición del viento regional estaría generando efectos opuestos para el desarrollo de la brisa en ambas costas.



Figura 1. Zona de estudio con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Además, las rosas de los vientos de Aeroparque de distintas horas del día, muestran una rotación del viento del sector N-NO por la mañana, al E por la tarde y finalmente al ESE hacia la noche. Este comportamiento sugiere la presencia del fenómeno en la región.

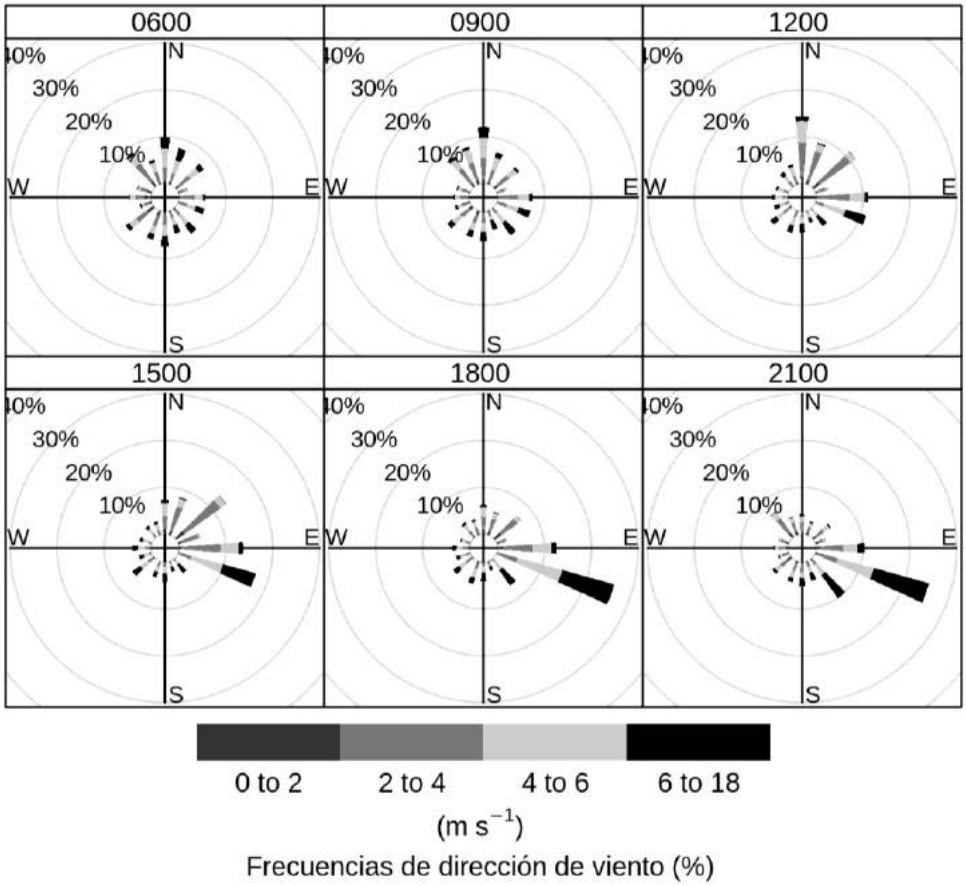


Figura 2. Rosas de los vientos de la estación de Aeroparque para las horas 0600, 0900, 1200, 1500, 1800 y 2100 hs, promedio del período 2009-2017.

MÉTODOS

Para poder identificar los días con desarrollo de la brisa se emplean los datos horarios de 5 estaciones meteorológicas de la región, Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio en Argentina, y Colonia y Carrasco en Uruguay, del período enero 2009 a julio 2017.
Algunas de las estaciones disponen de observaciones durante las 24 horas mientras que otras sólo de las horas diurnas (7 a 21 horas), lo cual es suficiente para poder aplicar los criterios de selección que se describen más adelante.
Por otro lado, a las mismas se les realizó un exhaustivo análisis de calidad de datos, para identificar valores no reales, datos faltantes y demás inconsistencias.
La temperatura del río se define con los datos diarios de temperatura de la superficie del mar de la base de datos NOAA OI SST V2 con resolución de 0.25°x0.25° (Reynolds et al. 2007). Para definir el viento a escala regional, denominado viento geostrófico, se adopta la observación del nivel de 850hPa del radiosondeo de Ezeiza de las 12 UTC (09 hora local), el cual se considera representativo de toda la zona de estudio. Para el análisis de la presión en superficie a escala regional se emplean los datos diarios de presión a nivel del mar del NCEP/NCAR Reanalysis 2 (Kanamitsu et al. 2002) con resolución de 2.5°x2.5°.
Con el propósito de identificar los días de ocurrencia de la "brisa de mar" en la región, se realizó una búsqueda bibliográfica de los diferentes métodos que se utilizan para tal fin. Como resultado de esa búsqueda se seleccionaron tres métodos que se consideraron apropiados para el estudio. El criterio utilizado para la selección se basó en tres premisas: i) que los datos necesarios estuvieran disponibles en la región de interés; ii) que el método estuviera descripto detalladamente para poder implementarlo en forma apropiada, y iii) que el método haya sido implementado en latitudes similares a las de nuestra región.
El método de Borne et al. (1998) propone las siguientes condiciones que se deben cumplir para identificar un día con desarrollo de brisa:

1. El cambio en la dirección del viento geostrófico en 850 hPa < 90° en 24 horas.
2. El cambio en la intensidad del viento geostrófico en 850 hPa < 6 m/s en 24 horas.
3. La velocidad del viento geostrófico en 850 hPa < 11 m/s.
4. La diferencia entre la temperatura máxima en tierra y la temperatura del río > 0°C.
5. El cambio de la dirección del viento en superficie > 30° en alguna de las horas comprendidas entre el amanecer + 1 hora y el atardecer - 5 horas.
6. El cociente entre el cambio de viento máximo en las horas del punto 5. y el promedio de los cambios de viento en las 5 horas siguientes debe ser > 6.

El método de Furberg et al. (2002) propone las siguientes condiciones:

1. Más de la mitad de las observaciones horarias del viento en la estación deben ser "offshore", de tierra hacia el mar, o en calma, en el período entre el amanecer - 6 horas y el amanecer + 2 horas.
2. El viento debe ser "onshore", del mar hacia la tierra, al menos por dos horas consecutivas en el período entre el amanecer + 2 horas y el atardecer + 2 horas.
3. Más de la mitad de las observaciones horarias en la estación deben ser "offshore", o en calma, en el período entre el atardecer + 2 horas y el atardecer + 8 horas.

El método de Azorin-Molina et al. (2011) propone las siguientes condiciones:

1. Entre el amanecer + 1 hora y el amanecer + 7.5 horas debe iniciarse el fenómeno con viento "onshore" y velocidad > 1.5 m/s.
2. En la hora previa al inicio, el viento debe ser "offshore" o su velocidad < 1.5 m/s.
3. El fenómeno debe finalizar entre el atardecer – 1 hora y el atardecer + 5 horas, con viento "offshore" o su velocidad < 1.5 m/s.

4. La velocidad del viento debe ser < 13.9 m/s desde el inicio hasta el fin de la brisa.
5. C_{pres} - $Min_{pres} \geq$ 1 Hpa , donde Cpres es la presión atmosférica al finalizar la brisa y Min_{press} es la presión mínima entre el inicio y el fin de la brisa.
6. $Atide_{daily}$ - $Atide_{general} \geq$ -0.5, donde $Atide_{daily}$ y $Atide_{general}$ representan las ondas de presión semidiurnas para el día en cuestión y para el período completo de estudio respectivamente. Cada término se calcula de la siguiente forma: Atide = (P10 + P22) - (P04 - P16), donde P10, P22, P04 y P16 son las presiones en esas horas del día, las cuales representan los valores máximos y mínimos de la onda de presión atmosférica promedio semidiurna.
7. $AirT_{10m}$ - SST $\geq$ 0, donde $AirT_{10m}$ es la temperatura máxima diaria en la estación y SST es la temperatura de la superficie del mar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se realizó un análisis exploratorio de resultados aplicando los tres métodos en la estación Aeroparque, la más cercana a la costa. El método de Azorin-Molina et al. (2011) identificó 55 días de brisa de un total de 3100 días con datos disponibles, es decir un 1.77% de casos. Dada la escasa cantidad de casos identificados con este método y la naturaleza de los filtros que impone, que exigen considerar un periodo de 18 horas del día, se considera que el mismo es demasiado restrictivo y por lo tanto inapropiado para la región.
El método de Furberg et al. (2002) identificó 53 casos de brisa de un total de 3116 días con datos, un 1,7% de casos. Este método también se descartó por los motivos que se detallan a continuación, además del reducido número de casos identificados. El máximo número de casos de brisa ocurre en invierno, como se puede apreciar en la Fig. 3.b, en contraste con la bibliografía del tema que indica que el verano es la estación del año más apropiada para el desarrollo de la brisa. Además, el mapa de presión promedio en superficie para el conjunto de días de brisa muestra una situación sinóptica típica post-frontal. Dado que este método exige la existencia de viento offshore previo a la aparición de viento onshore como consecuencia del desarrollo de la brisa, podría estar identificando en particular los días luego del pasaje de un frente frío en la región, situaciones que son más frecuentes en invierno.
Por último, el empleo del método de Borne et al. (1998) permitió identificar 206 casos de brisa en Aeroparque, de un total de 2972 días con datos, es decir un 6.9%, destacando que el total de días con datos es menor que en los casos anteriores debido a la necesidad de utilizar datos de radiosondeo. Además, la distribución del número de días de brisa por mes (ver Fig. 3c) es consistente con lo descripto en la bibliografía del tema ya que el máximo ocurre en verano y el mínimo en invierno. Por otro parte, el mapa medio de presión a nivel de mar (ver Fig. 4.b) y el de viento en 850hPa (no se incluye), muestran condiciones típicas anticiclónicas y vientos débiles “offshore” en 850hPa, lo cual beneficia el desarrollo del sistema de brisa ya que advecta aire cálido en dirección hacia el río, aumentando el gradiente térmico entre el agua y la tierra. Esto tiende a generar un intenso gradiente de presión perpendicular a la costa en capas bajas (Estoque M. A., 1962).

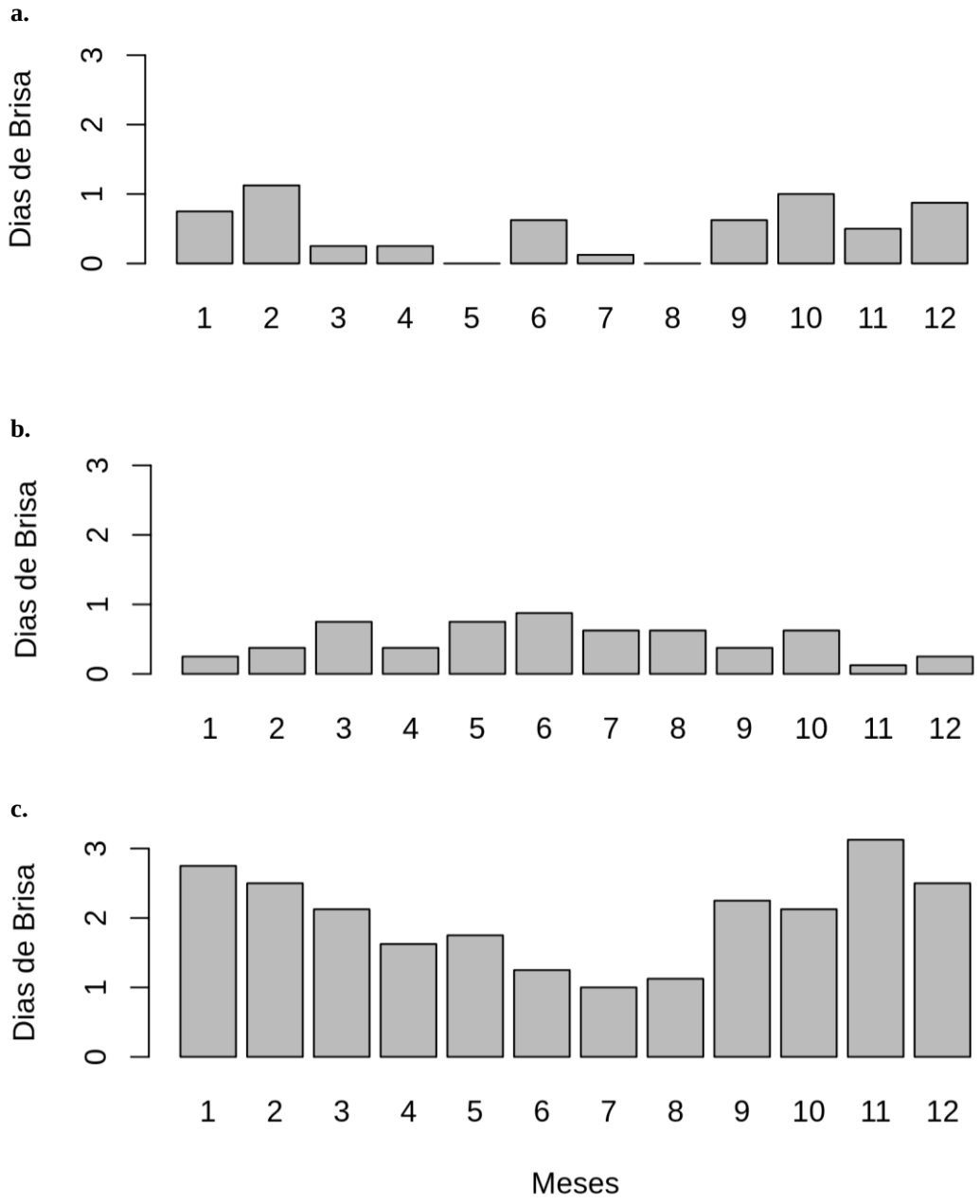


Figura 3 . Histograma de promedio de cantidad de casos de brisa por mes obtenidos en Aeroparque, según el criterio de **a.** Azorin-Molina et al. (2011), **b.** Furberg et al. (2002) y **c.** Borne et al. (1998) durante el período comprendido entre enero de 2009 y diciembre de 2016.

Por último, el empleo del método de Borne et al. (1998) permitió identificar 206 casos de brisa en Aeroparque, de un total de 2972 días con datos, es decir un 6.9%, destacando que el total de días con datos es menor que en los casos anteriores debido a la necesidad de utilizar datos de radiosondeo. Además, la distribución del número de días de brisa por mes (ver Fig. 3c) es consistente con lo descripto en la bibliografía del tema ya que el máximo ocurre en verano y el mínimo en invierno. Por otro parte, el mapa medio de presión a nivel de mar (ver Fig. 4.b) y el de viento en 850hPa (no se incluye), muestran condiciones típicas anticiclónicas y vientos débiles "offshore" en 850hPa, lo cual beneficia el desarrollo del sistema de brisa ya que advecta aire cálido en dirección hacia el río, aumentando el gradiente térmico entre el agua y la tierra. Esto tiende a generar un

intenso gradiente de presión perpendicular a la costa en capas bajas (Estoque M. A., 1962).

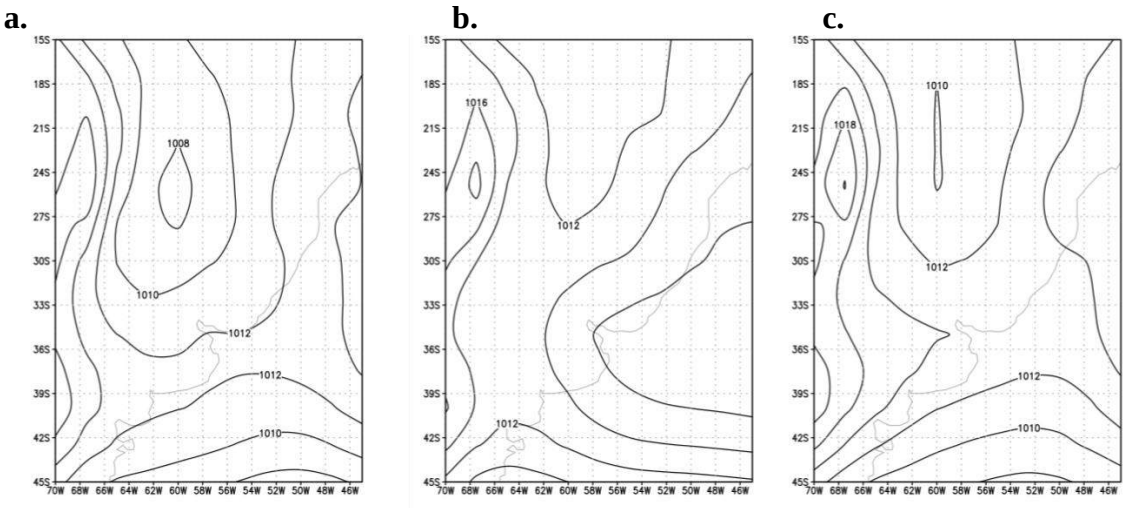


Figura 4. Presión en superficie promedio para el conjunto de días de brisa en Aeroparque identificados durante el período 2009-2017 según el criterio de selección **a.** Azorin-Molina et al. (2011), **b.** Borne et al. (1998) y **c.** Furberg et al. (2002).

En consecuencia, se decidió adoptar el método de Borne et al. (1998) como el más apropiado para la región y se lo empleó en las restantes estaciones meteorológicas. Para ello se definió el viento geostrófico a partir del viento del nivel de 850 hPa del radiosondeo de Ezeiza. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla I. En ella se indica la cantidad de días en los cuales se identificó la presencia de la brisa; la cantidad de días utilizados en ese método el que difiere en cada estación debido a la existencia de datos faltantes que impide la aplicación correcta del método; y finalmente el porcentaje de días de brisa con respecto al total de días analizados.

En la Tabla I se puede apreciar que la presencia de la brisa es mayor en las estaciones uruguayas que en las argentinas. Esto podría ser consecuencia de que la dirección predominante de viento en la región es del NE, es decir offshore en la costa uruguaya, situación que favorece el desarrollo de la brisa según lo indica el reciente estudio de Berri and Dezzutti (2020).

El comportamiento del viento a lo largo del día, como promedio del conjunto de casos de brisa identificados en cada lugar, se presenta en las siguientes figuras. La Fig. 5 muestra el resultado en las estaciones de la costa argentina en donde se puede apreciar que en todas ellas el viento es predominantemente del sector N por la mañana, rotando al E por la tarde (sector del río) y finalmente hacia el ESE. Esto muestra el comportamiento típico del viento en los días en que se desarrolla la brisa, de acuerdo al método implementado.

Tabla I. Resultados del método Borne et al. (1998) en las 5 estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación	Días de Brisa	Días utilizados por el método	Porcentaje de ocurrencia
Aeroparque	206	2972	6.93%
La Plata Aero	157	2803	5.60%
Punta Indio	124	2442	5.07%
Colonia	173	2151	8.04%
Carrasco	206	2826	7.29%

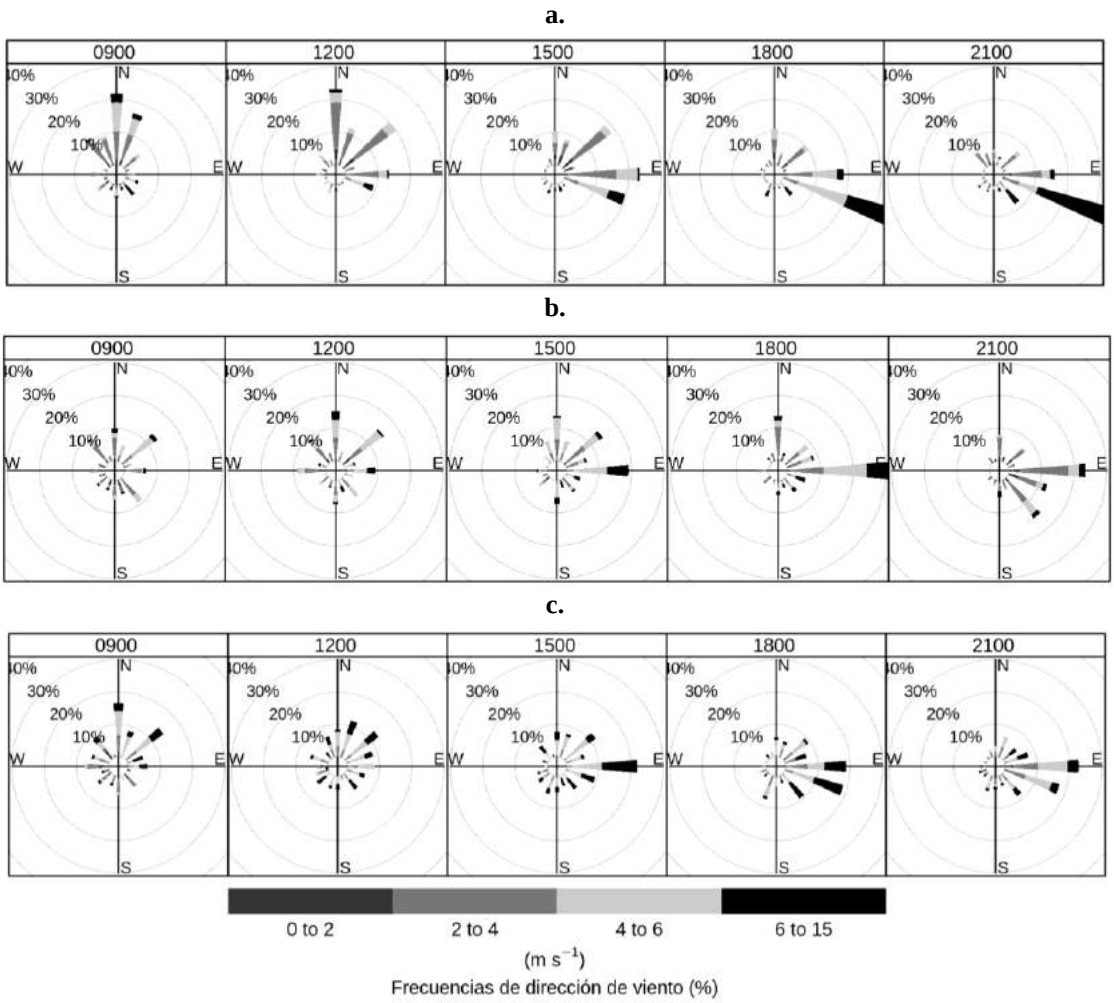


Figura 5. Rosas de vientos cada 3 horas, promedio de los días de brisa seleccionados en el período 2009-2017 por el método de Borne et al. (1998) en **a.** Aeroparque, **b.** La Plata Aero y **c.** Punta Indio.

En el caso de las estaciones uruguayas (Fig. 6), el viento es principalmente del NE por la mañana, al mediodía muestra direcciones variables y por la tarde se establece la brisa con viento del SE.

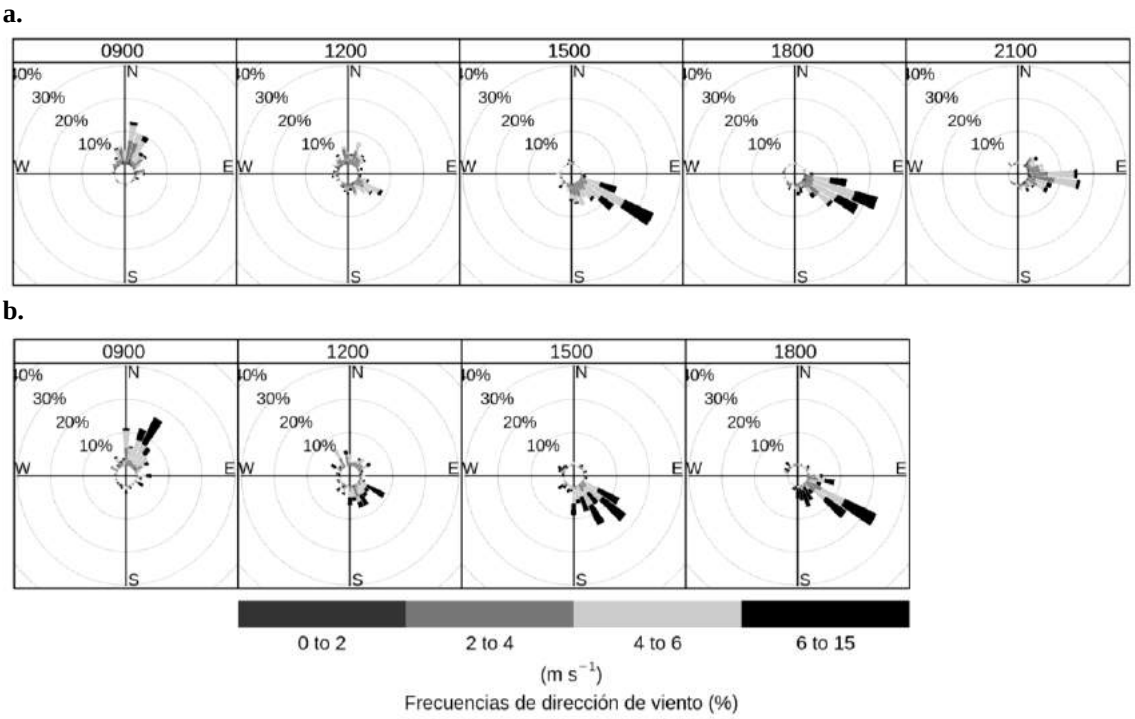


Figura 6. Rosa de los vientos cada 3 horas, promedio de los días de brisa seleccionados en el período 2009-2017 por el método de Borne et al. (1998) en **a.** Carrasco y **b.** Colonia.

Con respecto a la ocurrencia del fenómeno en los distintos meses del año, según el método de Borne et al. (1998), tanto en las estaciones uruguayas como en las argentinas se observa un ciclo anual muy similar al de la Fig 3.c.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten establecer las siguientes conclusiones:

- el resultado obtenido con los diferentes métodos empleados muestra marcados contrastes
- hay mayor ocurrencia del fenómeno en la costa uruguaya, posiblemente debido a los vientos predominantes del NE en la región
- la dirección predominante del viento durante gran parte de los días de brisa es del mismo cuadrante SE en ambas costas, con predominio del E en las estaciones argentinas y del SE en las uruguayas.

REFERENCIAS

Azorin-Molina, C., Sander T., and Deliang C.. "Development of selection algorithms and databases for sea breeze studies." Theoretical and applied climatology 106.3-4 (2011): 531-546.

Berri, G. J., and Dezzutti, M. "A Sea-Breeze Case Study in the La Plata River Region Using Local Observations, Satellite Images, and Model Simulations." Boundary-Layer Meteorology 177.1 (2020): 123-147.

Borne, K., D. Chen, and M. Nunez. "A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast." International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 18.8 (1998): 901-914.

Estoque, M. A. "The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation." Journal of the Atmospheric Sciences 19.3 (1962): 244-250.

Furberg, M., D. G. Steyn, and M. Baldi. "The climatology of sea breezes on Sardinia." International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 22.8 (2002): 917-932.

Kanamitsu, M., et al. "NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)." Bulletin of the American Meteorological Society 83.11 (2002): 1631-1644.

Reynolds, R. W., et al. "Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature." Journal of Climate 20.22 (2007): 5473-5496.

Simpson, J. E. Sea breeze and local winds. Cambridge University Press, 1994.

INVERSION OF POROELASTIC PARAMETERS AND SONIC WAVE VELOCITY MODELING IN VACA MUERTA FORMATION

Ravazzoli C. L.[a,c] and Blanco G. [b,c]

[a] *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b] *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c] *CONICET*

e-mail: claudia@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La Formación Vaca Muerta, ubicada en la Cuenca Neuquina, Argentina, está entre los mayores reservorios no convencionales de tipo shale (lutitas orgánicas) a nivel mundial, resultando un objetivo de alto interés en exploración y caracterización geofísica. Debido a su génesis y a su composición multiminerálica dichas lutitas presentan una gran heterogeneidad espacial, especialmente en la dirección vertical, pudiendo alcanzar espesores hasta 350 m. Dadas las características de estas rocas, la construcción de modelos elásticos que además de la existencia de poros y fluidos, incorporen su descripción litológica detallada así como parámetros físicos realistas para cada mineral y materia orgánica constituyen un desafío. Con estas ideas, utilizaremos la teoría poroelástica desarrollada por Brown y Korringa (1975), extendiendo la de Gassmann (1951) a medios porosos de matriz no homogénea, para modelar y ajustar velocidades sónicas P y S medidas en un pozo que atraviesa gran parte de la mencionada formación. En este modelo la compresibilidad monominerálica es reemplazada por otras dos: una asociada al volumen poral y otra a la matriz multifásica, cuyos valores pueden determinarse en laboratorio pero no son simples de calcular analíticamente. La falta de conocimiento de los parámetros de este modelo ha limitado fuertemente su aplicación práctica. Esto constituye una de las motivaciones de este trabajo, en el cual proponemos su determinación mediante técnicas de inversión numérica, lo cual no había sido hecho hasta el momento. La implementación de este procedimiento implica la modelar las propiedades elásticas de la matriz, habiéndose elegido el modelo de porosidad crítica, ampliamente aceptado en rocas sedimentarias clásticas. Como resultado de este estudio se obtiene una representación poroelástica macroscópica por intervalos de profundidad, se comprueba el grado de ajuste entre las velocidades medidas y calculadas, se analiza estadísticamente la distribución de los parámetros invertidos y se analiza la heterogeneidad elástica .

Palabras Clave: física de rocas, poroelasticidad, inversión, modelado, Vaca Muerta

INTRODUCTION

As is well known, the Vaca Muerta (VM) formation is the main source rock within the Neuquén basin (Argentina), which during the last decade has gained great interest as unconventional reservoir. From a lithological point of view it is characterized by organic rich shales, with variable organic content and mineralogical composition, mainly given by clay minerals, carbonates, quartz, feldspars and pyrite. The elastic modeling in this type of rocks is a complex problem due to the ambiguity in the

determination and definition of its porosity, being a parameter of great influence on its mechanical behavior. On the other hand, the properties of the matrix are difficult to model due to the effects of rock-fluid interaction, particularly associated to the high volume fraction of clay minerals, with very variable elastic properties (Dvorkin et al., 2007). On the other hand, the physical properties of the kerogen are difficult to measure and the information about them is scarce. They vary according to its type, composition and maturation state, with few measurements reported in the literature (Vernik, 2016). Understanding the relation between the bulk elastic parameters and wave velocities in these rocks is a very important task in unconventional rock physics.

In their classical paper Brown and Korringa (1975) developed a theory to describe the elastic behavior of porous saturated rocks with microheterogenous frames, valid for isotropic and anisotropic media. However, it has been almost unused for practical applications in geophysics due to the difficulties in the determination of the parameters involved. With these ideas, in this work we propose and test a simple modeling workflow for composite porous rocks which does not require detailed petrophysical information about mineral volume fractions and their corresponding elastic properties. This is particularly convenient when dealing with multiphase rocks, such as organic rich shales, which are formed by many different minerals and organic matter (besides of pore fluids). The physical parameters of such amount of constituents may introduce errors and uncertainty in the computations. To overcome this problem we show that it is possible to calibrate the model coefficients using a numerical inversion procedure without using a detailed description by means of Brown and Korringa and Gassmann (1951) formulations. The application of the procedure is illustrated using real data of a well across the Vaca Muerta shale formation. We analyze appropriate search ranges for the different model coefficients, with special attention on the feasibility of the inversion of the unjacketed pore modulus from velocity data. The overall goodness of fit between real and synthetic velocities is quantified, the statistical distribution of the inverted coefficients, as well as the determination of the critical porosity and the degree of elastic heterogeneity in this shale, are also discussed.

THEORETICAL BACKGROUND

The modeling and analysis of the elastic behavior of porous saturated rocks under variable pressures has long been studied by many authors from different fields. To take into account the role that pore fluid pressure plays in the deformation of porous media under different conditions (drained, undrained, jacketed, unjacketed), different compressibilities can be defined. This was analyzed by different authors, being the pioneer works of Gassmann (1951), Brown and Korringa (1975), Zimmerman et al. (1986) and Zimmerman (1991) for homogeneous rocks and single-phase fluids of particular importance in this subject.

Let us consider a composite fluid saturated rock of volume V_b composed by a solid rock matrix volume V_m formed by a mineral aggregate (which may also include organic mater, non-connected pores and unmovable fluids), and a pore volume V_p formed by connected pores. From now on we assume elastic isotropic behavior and we denote ϕ the connected or effective porosity of the medium. In what follows we review some fundamental concepts and definitions.

Undrained compression for homogeneous rock matrix: *Gassmann*'s equation

The compression of porous saturated rocks under *undrained conditions* (i.e. when fluids are not allowed to escape from the sample) is relevant in the deformation of low permeability rocks and wave propagation in porous media saturated with viscous fluids. In this situation the external confining pressure P_c and the pore pressure P_p are coupled to each other. For this case the associated bulk compressibility and modulus are defined as

$$C_{\text{sat}} = \frac{-1}{\bar{V}_b}\left(\frac{\partial V_b}{\partial P_c}\right)_{m_f} = \frac{1}{K_{\text{sat}}}, \tag{1}$$

for constant fluid mass (i.e. no flow). For the case of an homogeneous monominerallic rock matrix, we introduce an intrinsic mineral compressibility $C_0 = 1/K_0$ being $K_0$the corresponding mineral bulk modulus. This compressibility can be obtained from an *unjacketed test*, in which the rock matrix is compressed uniformly from inside and outside at the same time, so that the involved elastic modulus is that of the solid grains forming the matrix (Carcione, 2007, Zimmerman, 1991). Also, we denote K_{dry} the bulk modulus of the dry rock and K_f the pore fluid bulk modulus. The coefficient K_{sat} is known as the *Gassmann's* bulk modulus, and can be written in the form (Berryman and Milton 1991, Saxena et al. 2018)

$$K_{\text{sat}} = \frac{1}{C_{\text{sat}}} = \text{K}_{\text{dry}} + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha}{K_0} + \phi\left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_0}\right)}, \quad \alpha = 1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_0} \tag{2}$$

The coefficent α is the well known Biot and Willis coefficient for the poroelastic effective pressure law (Biot and Willis, 1957).

Undrained compression for heterogeneous matrix: *Brown and Korringa* equation

Taking into account the mixed mineralogy of most rocks Brown and Korringa (1975) extended Gassmann's equation to allow for arbitrarily mixed mineralogy. This extension was accomplished by adding one additional compressibility and replacing the mineral bulk modulus with a more general coefficient, somewhat less intuitive (Mavko and Mukerji, 2013): the *unjacketed bulk compressibility* C_M and its inverse K_M

$$C_M = \frac{-1}{\bar{V}_b}\left(\frac{\partial V_b}{\partial P_p}\right)_{P_d} = \frac{1}{K_M}, \tag{3}$$

which corresponds to an unjacketed compression applied on the rock at constant differential pressure. Since the rock matrix is compressed from inside and outside, with the same incremental pressure, the change in volume depends on the deformation of the mineral grains. Thus C_M represents the change in bulk volume of the heterogeneous solid aggregate. In the particular case of homogeneous (monominerallic) matrix clearly

$$C_M = \text{C}_0 \text{ and } K_M = \text{K}_0. \tag{4}$$

Since most rocks are multiminerallic it is important to distinguish C_M from C_0. The other additional compressibility, and the least intuitive of this theory, is the *unjacketed pore compressibility,* and its associated *pore bulk modulus,* defined as

$$C_\phi = \frac{-1}{\bar{V}_p}\left(\frac{\partial V_p}{\partial P_p}\right)_{P_d} = \frac{1}{K_\phi}, \tag{5}$$

which quantify the variations in the pore volume under the same incremental pore and confining pressures. For the particular homogeneous case, the following equalities hold (Brown and Korringa,1975, Saxena et al. 2018)

$$C_\phi = C_M = C_0 \text{ and } K_\phi = K_M = K_0. \quad (6)$$

The undrained compressibility and bulk modulus in BK theory can be written in the form (Berryman and Milton, 1991)

$$K_{\text{sat}} = \frac{1}{C_{\text{sat}}} = K_{\text{dry}} + \frac{\beta^2}{\frac{\beta}{K_M} + \phi\left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_\phi}\right)}, \quad \beta = 1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_M} \quad (7)$$

It must be remarked the similarity of this expression with Gassmann's equation (2), being clearly a particular case for monominerallic solids. Different authors have proposed experimental procedures for the determination of these compressibilities (such as Duranti 2018, Müller and Sahay 2012 and others), while others analyzed their analytical computation using effective medium theories for simplified geometries. The values of C_M,C_ϕ were discussed in several papers such as Berge and Berryman (1995), Berge (1998), Mavko and Mukerji (2013), Wollner and Mavko (2017) and Duranti (2018). As explained in the following section, in this paper the coefficients $K_M K_{phi}$ and K_0 (and others) will be determined using a *numerical inversion procedure*.

Shear modulus and wave velocities

To complete the elastic description of the rock, it is necessary to recall the rigidity modulus of the composite saturated rock μ, which in agreement with Gassmann's theory, is taken equal to that of the solid frame (dry rock) μ_{dry}

$$\mu = \mu_{\text{dry}}. \quad (8)$$

This also holds for multimineral matrix, taking into account that in a static pure shear experiment on the porous saturated medium, the pore fluid does not support shear stresses and consequently does not change the rigidity of the rock. Finally, using (7) and (8) and denoting ρ_b the bulk density of the porous saturated rock, we can compute the elastic compressional and shear wave velocities for this model in the form

$$V_P^m = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu}{\rho_b}}, \; V_S^m = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_b}}. \quad (9)$$

Elasticity of the rock frame: the *critical porosity* model

For modeling purposes to estimate the elastic properties of the dry rock we choose the *critical porosity* model proposed by Nur et al. (1998) based on the observation that for most porous materials there is a limiting value for porosity, denoted ϕ_c, from which the mechanical behavior of the aggregate is that of a suspension (Mavko et al. 2009). Beyond this critical value, the rock loses its rigidty and the bulk and shear moduli of the dry rock can be estimated using the simple Reuss average. For porosities lower than ϕ_c the mineral grains are load-bearing and the moduli decrease linearly from the mineral values at zero porosity K_0,μ_0 to the suspension values at the critical

porosity. Then in the isotropic homogeneous case, the moduli are given by the following linear functions

$$K_{\text{dry}}=\text{K}_0\left(1-\frac{\phi}{\phi_c}\right), \qquad \mu_{\text{dry}}=\mu_0\left(1-\frac{\phi}{\phi_c}\right). \tag{10}$$

For the multimineral matrix case, according to BK theory, the modulus K_0 is *replaced* by the unjacketed bulk modulus K_M and, for consistency, we also introduce a generalized shear modulus μ_M that replaces μ_0. It is important to remark that for the practical application the organic matter, will be considered as a part of the rock frame and treated as an additional mineral within K_M,μ_M. As pointed out by Mavko et al. (2009) the relationship between these elastic parameters, the elastic moduli of the individual mineral constituents and their volume fractions is not clear. That encouraged us to determine these coefficients numerically using an inversion technique as explained in the next section.

APPLICATION USING DATA FROM VACA MUERTA SHALE

Description of data

For the practical application of the elastic workflow described we use information of a vertical well located in the transition between the black oil to live oil zones within Neuquén basin, whose name and location are kept confidential.

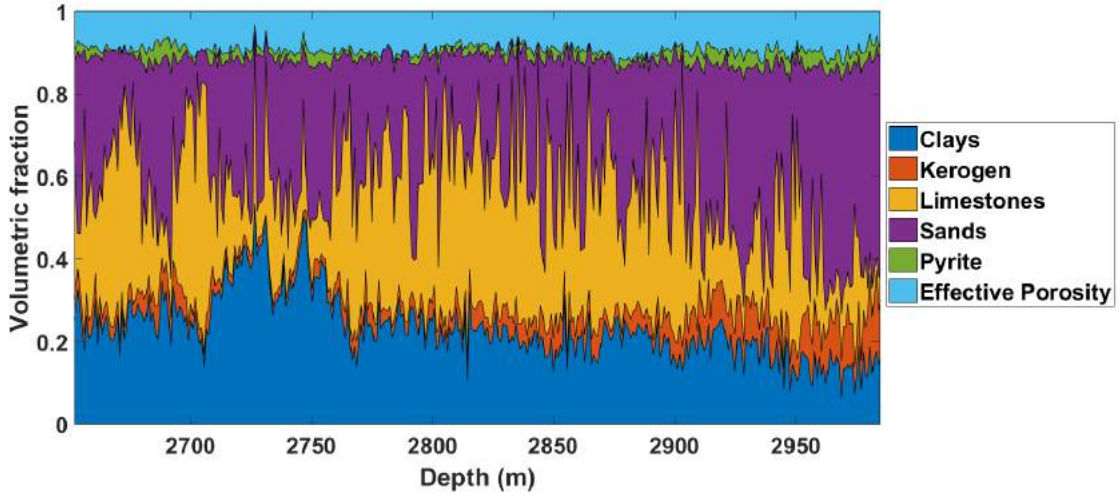


Figure 1. Lithological description of VM shale including kerogen fraction and effective porosity.

We selected a depth interval within Vaca Muerta shale formation between 2650 to 2985 m, (335 meters thick), in which we have sonic compressional and shear wave velocities (2196 data spaced every 0.15 m), ranging from 2700 to 5030 m/s for P waves and from 1500 to 2400 m/s for S waves. Bulk density, effective porosity, lithological description (mineral volume fractions), kerogen fraction and water saturation logs are also available. The lithological description profiles are given in terms of mineral groups, mainly: clay, carbonate, pyrite and sands in variable proportions. However, for the implementation of the workflow we don't use these detailed volume fractions. This information is shown in Figure 1 to illustrate the vertical heterogeneity in the well at

different scales. This same data set was previously used by Ravazzoli et al. (2017) and Blanco et al. (2018), who presented highly detailed elastic workflows.

The characterization of the hydrocarbon fluids was done in laboratory using PVT analysis, obtaining that the API gravity of oil is 41.2 and the specific gravity of hydrocarbon gas is 0.732. Moreover, petrophysical measurements were done on a set of core samples in which the saturation of water, gas and oil were determined from which the oil/gas fraction will be assumed constant along the well being in average 75% oil, 25% gas. The physical properties of the fluids (density and bulk modulus) were estimated using the semi-empirical equations of Batzle and Wang (1992). For the computations, the effective bulk modulus of the mixture of pore fluids were obtained using the saturations and the classical isostress Reuss's average. The effective fluid density was computed as weighted average of the individual values. The effective porosity ranges from 0.5 to 15%, with an average of 9%.

Implementation of the modeling and inversion workflow

For the implementation of the workflow we subdivided the logs in a number of non overlapping windows containing N data points (velocities, bulk density, effective porosity, fluid saturations), with depth spacing of 0.15 m. Our goal is to obtain an elastic macroscopic representation valid within each window of the profiles. In this example we take 366 windows including N=6 data points, so that we obtain a macromodel for a window scale of about 0.9 m. However the window size can be selected according to the vertical resolution desired.

The calibration of the model requires the determination of the poroelastic parameters: K_ϕ,K_M,μ_M,ϕ_c within each window, using the measured log densities and porosities. To determine the unknown parameters we define for each window, an L_2 norm scalar cost function $Q\left(K_\phi,\mathrm{K}_M,\mu_M,\phi_c\right)$, measuring the departure between real and synthetic velocity data computed using eqns. (9) combined with (7), (8) and (10). This velocity model is hereafter denoted as **BKCP**.

To obtain the optimum parameters, those for which Q results minimum, we use the *pattern search* algorithm. To obtain significant results we need to define appropriate search ranges for each parameter. For K_M,μ_M, the search range was taken sufficiently large (between 2 and 100 GPa) to include the elastic moduli for most minerals, using standard values taken from the literature (Mavko et al. 2009). Regarding the selection of a suitable numerical range for K_ϕ, it should be noted that this parameter is the least intuitive of all. Berge and Berryman (1995) and Berge (1998) found that $K_\phi$and K_M are independent parameters and also that the pore compressibility of certain composite materials can be negative when the bulk moduli of the components differ by at least a factor of 5, a situation possible in a mixture of sands and clays. Many years later Mavko and Mukerji (2013) found positive values lower than 30 GPa and Wollner and Mavko (2017) found values in the range 20-60 GPa and recently Duranti (2018) reported experimental values for sandstones between about 0 and 15 GPa. The optimum critical porosities were searched in the range 0.2 to 0.75 in agreement with Bachrach et al. (2013).

For further analysis, we also implemented a similar inversion procedure based on the classical Gassmann's model for *homogeneous frames*, using eqns. (2) combined

with (8), (9) and (10). In this case the parameters inverted are K_0,$\mu_{0,}\phi_c$ and this model will be referred to as **GCP**. It is worthwhile to remark that for the computations we use the measured bulk density log. Once we determined the model parameters we compute the synthetic velocity on each data point and evaluate the goodness of fit using the root mean square error (RMS). We remark that for each combination of parameters within the model space, the positive definiteness of the elastic strain energy was verified.

RESULTS AND DISCUSSION

Using the workflow described in the previous section, next we show its application, which involves the inversion of the set of poroelastic parameters, to fit the sonic velocities in a thick interval of the Vaca Muerta formation. In what follows we focus on the following topics:

- fitting of the measured sonic P and S wave velocities using BKCP model for mixed mineralogy, evaluating the overall goodness of fit;
- comparison of fitting results using the simpler GCP approach for an *equivalent homogeneous* frame;
- analyze the feasibility of inverting the unjacketed pore modulus K_ϕ for each window and an appropriate search range;
- inversion and analysis of the unjacketed moduli K_M,μ_M within each window;
- comparison with the moduli obtained using GPC, i.e K_0,μ_0 and
- the determination of critical porosities $\phi_c$along the well.

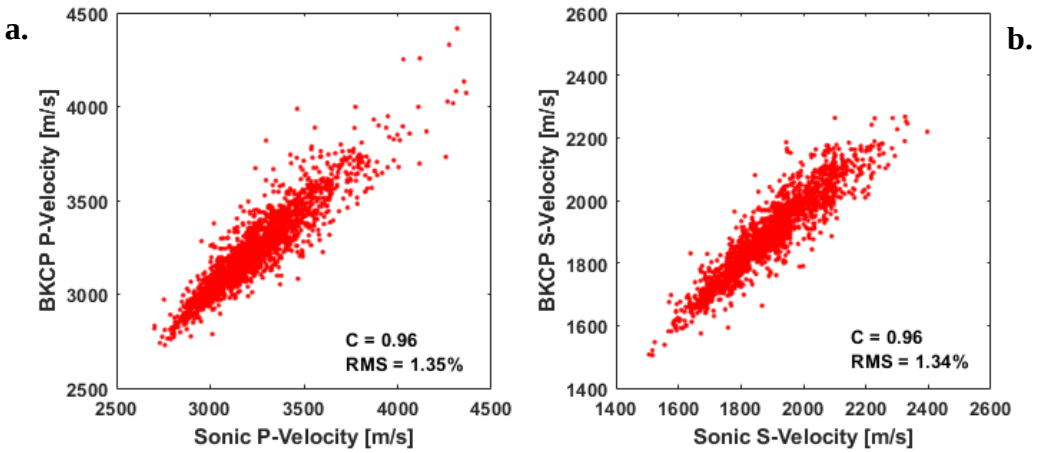


Figure 2. Synthetic vs. real sonic velocities using BKCP model **a.** for P-waves, **b.** for S-waves.

Figure 2 shows cross plots between observed and calculated velocities using BKCP model, in which, despite of the apparent dispersion, we obtained very good quality of fitting. This is quantified by means of the low RMS errors and high correlation coefficient C obtained, being on the same order for both models.

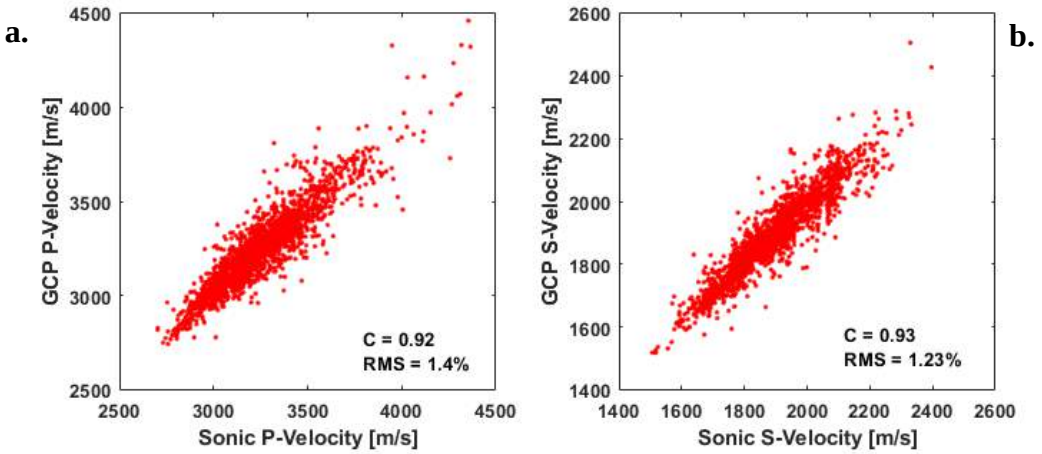


Figure 3. Synthetic vs. real sonic velocities using GCP model, **a.** for P-waves, **b.** for S-waves.

In Figure 3 we show the analogous results using the homogeneous approach given by the GCP model, obtaining similar quality of fit.

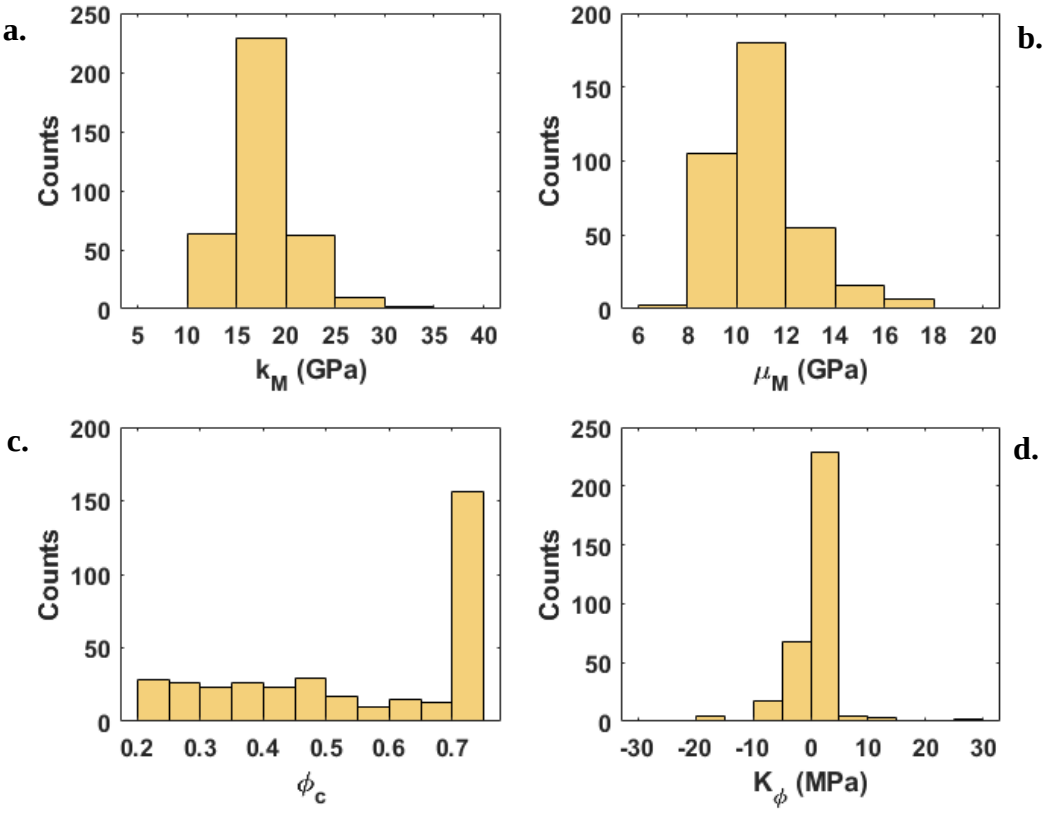


Figure 4. Histograms of parameters inverted using BKCP. **a.** K_M, **b,** μ_M, **c.** ϕ_c, **d.** K_ϕ.

The parameters inverted for the BKCP model are shown in Figure 4 using histograms to analyze their statistical significance along the well. We observe that the most significant values of modulus K_M are in the range 10 – 30 GPa and for μ_M between 6 – 18 GPa. The critical porosity parameter shows values almost equally distributed in

the whole range, except near the maximum acceptable value, showing a large amount of points. The significance of these estimates should be compared with other data sets and other inversion strategies, given that there are no values reported for organic shales.

The estimation of the unjacketed pore modulus K_ϕ deserves some more analysis. First we made some tests using strictly positive values within the same range used for K_M,μ_M (i.e., 2 – 100 GPa), however we did not find stable solutions. In that range, the large numerical difference between $1/K_\phi$ and $1/K_f$ in equation (7) makes K_{sat} almost insensitive to K_ϕ, unless a proper search range is defined for the inversion. This lack of sensitivity of K_{sat} to K_ϕ (and consequently in the computed velocities), was also pointed out by Zimmerman (1991). This observation and the analysis made by Berge and Berryman (1995) encouraged us to choose a smaller range, from -5 GPa to 5 GPa, allowing for negative and positive values. In this way, we obtained significant results which are plotted in the histogram shown in Figure 4(d), where we restricted the image to the significant interval between about -20 MPa to 30 MPa. The practical validity of these results needs further analysis and, if possible, an experimental verification, which implies careful laboratory procedures (Duranti, 2018).

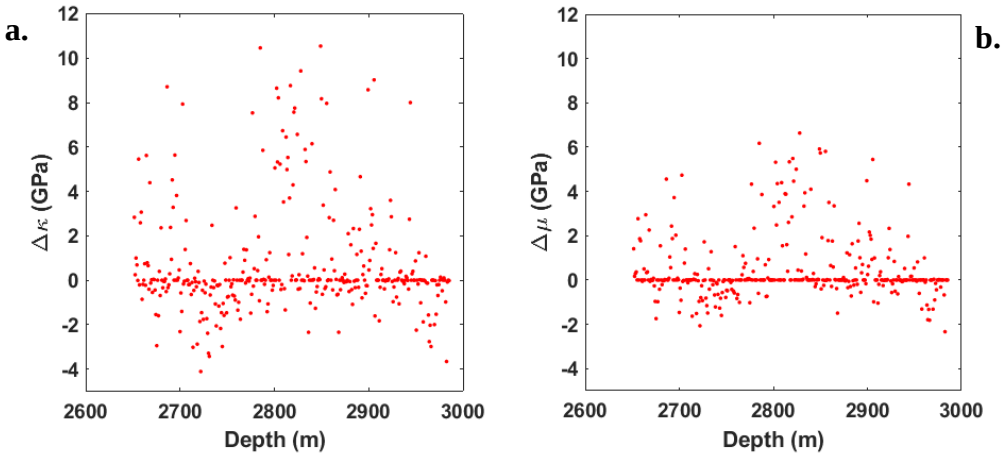


Figure 5. Departures between elastic parameters of GCP and BKCP, **a.** unjacketed bulk modulus, **b.** generalized shear modulus.

Finally, in Figure 5 we analyze the differences between the elastic moduli obtained with the two models described, denoted as $\Delta K=(K_0 - K_M)$ and $\Delta\mu=(\mu_0 - \mu_M)$. As can be seen, although there are a large number of depths in which the differences are near zero, the departures indicate that statistically, the elastic behavior of the rock cannot be completely represented using the equivalent homogeneous approach based on Gassmann's theory (GCP). Taking into account equation (4), those departures can be interpreted as a measure of elastic heterogeneity of the medium at scales smaller than the window size. A similar reasoning, but considering the discrepancies with respect to the classical Voigt-Reuss-Hill averages, was proposed by Duranti (2018), who found differences on the same order of magnitude. We remark that no statistical correlation was found between ΔK,$\Delta\mu$ and any of the volume fractions of the shale (shown in Fig. 1), from which we conclude that those discrepancies must be related to other petrophysical characteristics of the rocks.

CONCLUSIONS

In this work we presented and applied an original elastic workflow for modeling and inversion of velocities and poroelastic parameters based on the classic Brown and Korringa (1975) theory combined with the critical porosity model. In this way we fitted sonic log velocities corresponding to a thick interval of the Vaca Muerta organic shale formation, Argentina. Although this procedure does not require detailed information about the volume fractions and physical properties of the different rock constituents, it gives very good fitting results, with overall RMS errors lower than 1.5% along the well. This workflow involves the solution of an inverse problem to determine the set of poroelastic parameters in the formulation: the unjacketed pore and bulk moduli, a generalized shear modulus and the critical porosity of the rocks. The procedure was implemented using non overlapping windows, which define a length scale for the computations and the results.

The inverted unjacketed bulk and shear moduli are analyzed statistically, giving values very reasonable taking into account the mineralogy of the rocks under study, without the need of using effective medium theories with their underlying assumptions. Regarding the inversion of the unjacketed pore modulus from velocity data, we remark that its determination is conditioned by the sensitivity of the compressional wave velocity to that coefficient. The search range for this parameter requires a careful selection, having found convenient to consider negative and positive values as well. The reliability of these results must still be checked by independent methods and with data sets for different kinds of rocks.

By comparing the quality of velocity fitting between BKCP procedure with a simpler workflow based on Gassmann (1951) formulation for homogeneous rocks (GCP), we conclude that the parameter K_ϕ is not crucial for velocity modeling and wave propagation problems. We also compared the unjacketed bulk and shear elastic moduli resulting from both procedures, which allowed us to analyze statistically the elastic heterogeneity of the medium at scales smaller than the window size. From this point of view we conclude that the elastic behavior of the rock cannot be accurately represented using the equivalent homogeneous moduli obtained from Gassmann's theory at the window scale.

The critical porosity values were also determined along the well, obtaining results which are in good agreement with those expected for shales. These estimations are relevant taking into account the scarcity of published information on this parameter for organic shales.

It is worthwhile to remark that the methods described are not limited to the example analyzed in this study and can be applied to any other porous rock type. They can be useful for applications such as fluid substitution, elastic and velocity upscaling and for pore fluids sensitivity analysis of geomechanical parameters, seismic velocities and related attributes.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank to YPF, Argentina for giving us access to the data used in this work. Partial financing was received from grants of CONICET and Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

REFERENCES

Bachrach, R., Osypov K., Nichols, D., Yang Y., Liu, Y. and Woodward M. Applications of deterministic and stochastic rock physics modelling to anisotropic velocity model building, *Geophysical Prospecting*, 61, 404–415 (2013) https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2012.01133.x

Batzle, M. and Wang, Z. Seismic properties of pore fluids, *Geophysics*, 57, 1396–1408 (1992). https://doi.org/10.1190/1.1443207

Berge, P. A. Pore compressibility in rocks, *Poromechanics*, J. F. Thimus, Y. Abousleiman, A. H. Cheng, O. Coussy, and E. Detournay, eds. A.A. Balkema, Rotterdam, 351–356 (1998).

Berge, P. and Berryman, J. Realizability of Negative Pore Compressibility in Poroelastic Composites. *Journal of Applied Mechanics*, 62(4), 1053-1062 (1995). https://doi.org/10.1115/1.2896042

Berryman, J. and Milton, G. Exact results for generalized Gassmann's equations in composite porous media with two constituents, *Geophysics* 56 (12), 1950-1960 (1991). https://doi.org/10.1190/1.1443006

Biot, M.A. and Willis, D.G. The elastic coefficients of the theory of consolidation, *J.Appl. Mech., Trans. ASME* , 79, 594-601 (1957).

Blanco G., Ravazzoli, C.L. and Soldo, J.C. Velocity models for Vaca Muerta organic shales calibrated with laboratory and well data (*in Spanish*). *Proceedings of X IAPG CONEXPLO Conference 2018*, Argentina, Technical Papers Students Program Book, 1-18 (2018). http://www.iapg.org.ar/congresos/2018/conexplo/

Brown, R. J. S., and Korringa J. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid, *Geophysics*, 40,608–616 (1975). https://doi.org/10.1190/1.1440551

Carcione, J. M. *Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic, Porous and Electromagnetic Media*, 2nd Edition, Elsevier (2007). https://doi.org/10.1016/C2013-0-18893-9

Duranti, L. On the Homogeneity of Poroelastic Media: Experimental Measurements of K_ϕ, 2018 *SEG International Exposition and 88th Annual Meeting*, 3537-3541 (2018). https://doi.org/10.1190/segam2018-2998972.1

Dvorkin,J., Mavko,G., Gurevich B. Fluid substitution in shaley sediments using effective porosity, *Geophysics*, 72(3), 1-8 (2007). https://doi.org/10.1190/1.2565256

Gassmann, F. "Über die elastizität poröser medien". *Vier. der Natur. Gesellschaft Zürich*, 96, 1–23 (1951).

Mavko, G, Mukerji, T. and Dvorkin, J. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*, 2nd Edn. Cambridge, New York (2009). https://doi.org/10.1017/CBO9780511626753

Mavko G. and Mukerji T. Estimating Brown-Korringa constants for fluid substitution in multimineralic rocks, *Geophysics* 78(3), L27–L35 (2013). https://10.1190/GEO2012-0056.1

Müller, T. and Sahay, P. Porosity perturbations and poroelastic compressibilities *Geophysics*, 78 (1) A7–A11 (2013). https://doi.org/10.1190/geo2012-0129.1

Nur A., Mavko G., Dvorkin J. and Galmudi D. Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks, *The Leading Edge*, 17(3), 357-362 (1998). https://doi.org/10.1190/1.1887540

Ravazzoli, C., Blanco G. and Soldo J.C.. Petro-elastic analysis of P ans S wave velocities in Vaca Muerta formation (*in Spanish*), *XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 2017, Expanded Abstracts Book*, 77-80, http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60718, ISBN 978-950-34-1471-2.

Saxena, V., Krief M. and Adam L. *Handbook of Borehole Acoustics and Rock Physics for Reservoir Characterization*, Elsevier (2018) ISBN: 978-0-12-812204-4

Vernik, L. Seismic petrophysics in quantitative interpretation, *Investigations in Geophysics* 18, Soc of Exploration Geophysics (2016). https://doi.org/ 10.1190/1.9781560803256

Wollner, U. and Mavko G. Brown and Korringa constants for heterogeneous thinly layered poroelastic media, Journal of Geophysical Research 122(2), 895-905 (2017). https://doi.org/10.1002/2016JB013672

Zimmerman, R. W., Somerton, W. H. and King, M. S. Compressibility of porous rocks. Journal of Geophysical Research, 91(B12), 12765-12777 (1986). https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12765.

Zimmerman, R. Compressibility of sandstones. Developments in Petroleum Science, 29, Elsevier (1991). ISBN-0-444-88325-8.

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL ANTE INCENDIOS FORESTALES EN CUENCA DEL ARROYO VENTANA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Rodríguez Souilla J.[ab], y Gaspari F. J. [a]

[a] *Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b] *Becario de Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC) - Consejo Interuniversitario Nacional (CIN), ARGENTINA*

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los pastizales pampeanos están adaptados ecológicamente a la ocurrencia de incendios. Si bien estos eventos representan un componente natural del ecosistema, el avance de especies exóticas y el manejo de los sistemas agropecuarios han modificado su frecuencia e intensidad. En caso de incendios forestales, el impacto del evento dependerá de la intensidad, recurrencia y duración, y se manifiesta especialmente al poco tiempo de sucedido el evento, que principalmente desencadenan procesos erosivos. El objetivo fue cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la Cuenca del Arroyo Ventana, Provincia de Buenos Aires, sitio donde se registraron dos incendios que afectaron gran superficie en los años 2013 y 2018. El método de estimación aplicado fue la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mediante un procesamiento espacial de datos (vectoriales, ráster y tabulares) y aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes satelitales y cartografía, con el Software de código abierto QGis. También se aplicó la USLE para el año 2020 para evaluar momentos posteriores a los eventos mencionados. Se obtuvo que la erosión hídrica superficial actual es >50 Mg/ha.año en el 58 % de la Cuenca. Los incendios en áreas boscosas aumentan aún más la erodabilidad de los suelos que en pastizales, consecuentemente, la vulnerabilidad de estos a la erosión hídrica superficial ante eventos torrenciales. Por su parte, la ventana de perturbación es mayor en el tiempo ante incendios forestales que sobre pastizales, observando que este ecosistema presenta gran resiliencia ante incendios. Asimismo, se evidenció el importante rol que tienen los sitios forestales como reguladores hídricos y de protección de sitios altamente erodables de cuencas hidrográficas. Si bien este ecosistema sin vegetación arbórea presenta una alta vulnerabilidad luego de los incendios, la ocurrencia de incendios forestales empeora dicha situación.

Palabras clave: Incendios forestales; USLE; Cuenca hidrográfica; Erosión hídrica.

INTRODUCCIÓN

En áreas rurales, el reemplazo de coberturas naturales puede ocurrir por la ocurrencia de incendios. En caso de incendios forestales, el impacto del evento dependerá de la intensidad, recurrencia y duración del mismo, y se manifiesta, sobre todo, al poco tiempo de sucedido el evento. Estos efectos pueden ser directos tales como pérdida de animales, de vegetación y degradación del suelo. Los efectos indirectos, por su parte, corresponden desde la erosión del suelo y la contaminación del agua hasta el ensuciamiento de represas y deslizamientos de tierra. El suelo después de un incendio es susceptible a sufrir erosión, debido a lo expuesto que queda al viento y agua (Caon, 2014, Shakesby, 2011).

Las repercusiones en el suelo dependen de la topografía del lugar, intensidad del proceso de erosión, tasa de regeneración de la cubierta vegetal post-incendio, recurrencia, intensidad y duración del fuego. Los principales impactos de los incendios forestales son a nivel de las propiedades (físicas, químicas y biológicas) y productividad del suelo y se expresan por la generación de erosión, pérdida de nutrientes, disminución de la materia orgánica, alteración de la vegetación. Además, éstos se ven afectados principalmente en sus propiedades físicas, como la repelencia y la estabilidad de los agregados, aumentando su erosionabilidad de acuerdo con la severidad del incendio.

Resulta un desafío la cuantificación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica después de un incendio, dependiendo esta de la ocurrencia de precipitaciones los primeros meses luego del evento ("ventana de alteración" (Prosser & Williams, 1998)) y sus respectivas intensidades y duraciones.

Con relación a los incendios, la mayor pérdida de suelo por erosión suele producirse en los primeros meses inmediatamente posteriores a estos, y puede verse especialmente incrementada si durante este período, considerado crítico, se producen episodios de lluvias torrenciales (Ramos, 2010).

El modelo Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation* (USLE)) es un modelo paramétrico para estimar la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas, formulado por Wischmeier y Smith, en el año 1965. Es un modelo matemático empírico, que utiliza información sobre precipitación, suelo, pendiente del terreno y de uso y manejo del suelo, y combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica, para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación (Wischmeier & Smith, 1978). La USLE es una función de la erosividad de las precipitaciones, de la erodabilidad del suelo y de uso del suelo que permite determinar las tasas de erosión para diferentes sistemas y manejo de suelos. Al comparar estas tasas de erosión con la tolerancia edáfica, se pueden seleccionar las combinaciones de cultivo y manejo apropiadas para el control adecuado de la degradación por erosión hídrica superficial.

En la zona serrana del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, la erosión hídrica superficial provoca una decreciente producción agropecuaria, consecuencia del actual manejo del suelo, la pérdida del horizonte superficial y de la disponibilidad de agua superficial y subterránea. En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos, han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian una importante degradación y un escaso grado de conservación (Vázquez & Zulaica, 2011) con la manifestación de incendios de diversa agresividad.

Los incendios representan un componente natural del ecosistema de pastizal pampeano. Sin embargo, el avance de la urbanización sobre espacios naturales tuvo como consecuencia que la sociedad los considere un disturbio que debe ser controlado. El hombre al avanzar sobre áreas de pastizales y forestales e intentar reducir los efectos de los incendios, alteró su frecuencia, intensidad y extensión. La Comarca de la Sierra de la Ventana no es ajena a esta situación, anualmente se registran fuegos con efectos cada vez más preocupantes. Dicho sitio ha sufrido naturalmente incendios a lo largo de su historia, pero en los últimos 20 años la ocurrencia es mayor y ha tenido consecuencias negativas para la sociedad (Mihcalijos, 2018).

El objetivo del presente trabajo fue realizar una cuantificación de la pérdida anual de suelo debido a incendios en la Cuenca del Arroyo Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina, e interpretar variabilidad debida a dichos eventos.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio corresponde a la Cuenca del Arroyo Ventana, cabecera este del río Sauce Chico, cuya superficie es de 75,95 km^2, ubicada en el Sistema Bonaerense de Ventania (38° 01´ y 38° 07´ S y 61° 57´ y 62° 08´ O) (Gaspari et al. 2009) (ver Fig. 1). Está formada por los arroyos La Ventana y San Juan y su curso principal corre en sentido E-O, siendo el afluente más caudaloso del Sauce Chico.

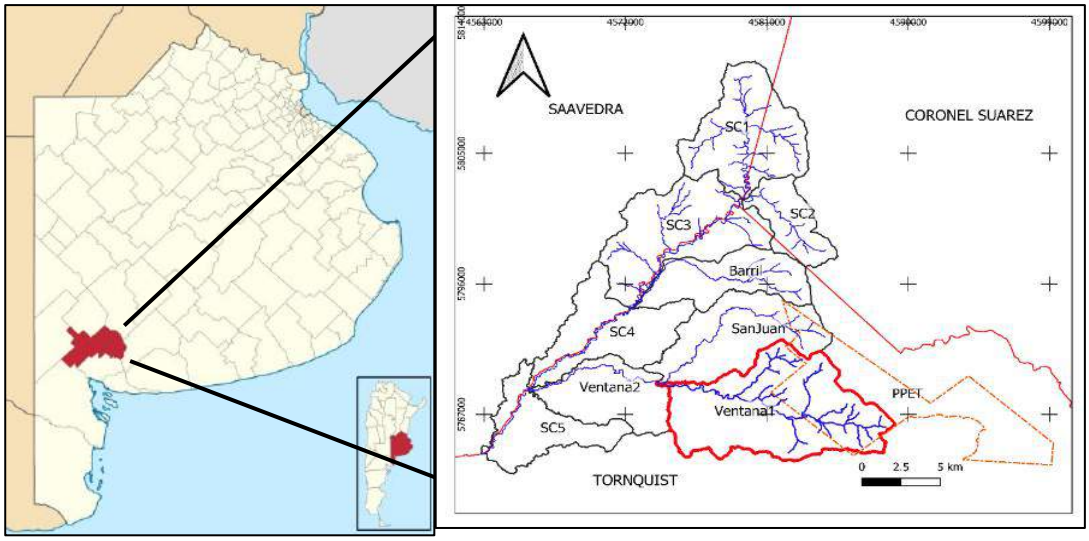


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio con la cuenca del Arroyo Ventana.
Fuente: Gaspari et al. (2019) Adaptación propia.

Las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires conforman una unidad orográfica que representa uno de los ejemplos más puro de estructura de plegamiento conocido en el mundo (Harrington, 1947), está compuesta por cordones subparalelos los cuales forman un conjunto de elevaciones bien definidos, en sentido noroeste-sudeste, de 180 km de longitud.

La vegetación nativa predominante es la estepa graminosa que cubren las Sierras Australes, ubicada en la Región Fitogeográfica Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Austral (Frangi & Bottino, 1995). La vegetación natural está siendo invadida por especies introducidas de rápida propagación y elevada combustibilidad (cardos, coníferas, eucaliptos y retamas), que compiten por el nicho ecológico con las nativas. Además, la actividad humana ha provocado cambios en el ecosistema al convertir las tierras a la actividad agrícola-ganadera, que se visualiza en algunas comunidades dominadas por pastizales y arbustos que están aparentemente relacionadas a áreas con pastoreo excesivos y otras a suelos erosionados principalmente en forma natural. La vegetación vinculada a la intervención humana está representada por un ambiente serrano, donde las modificaciones se deben principalmente a la introducción de especies vegetales para la producción agropecuaria, pastoreo de animales silvestres y domésticos introducidos, usos del fuego, forestaciones, extracción de especies de interés en florería y el trazado de caminos y sendas.

Según la clasificación de Thornthwaite, el clima es templado subhúmedo seco (C1) (Burgos, 1968) quedando la región comprendida en la franja zonal de clima templado húmedo pampeano, con veranos secos y cálidos e inviernos secos y fríos. Presenta una temperatura media anual es de 13,9 ºC y precipitación media histórica de 723 mm (últimos 30 años), con una máxima de 1056 mm y mínima de 396 mm. En los últimos 10 años se ha registrado un aumento anual de las precipitaciones de 120 mm comparado con la media histórica, registrando mayores aumentos en los meses de enero, febrero, octubre y noviembre, y

disminución en el mes de diciembre, momento clave donde se registran altos valores de evapotranspiración y temperaturas medias.

Los suelos serranos se desarrollaron a partir de sedimentos loéssicos arenosos que cubrieron las pendientes y cumbres con espesor variable, donde se mezclan clastos, detritos de rocas y afloramientos rocosos. Las unidades cartográficas de suelo (E 1:50.000) (IGN, 1870), se conforman con las series según: Asociación Bonete (Haplustol petrocálcio, franco fino, mixta); Asoc. Tornquist (Argiustol típico, limosa fino, mixta); Asoc. Dufaur (Paleustol petrocálcico,limosa fina, mixta); Asoc. Erize (Argiustol petrocálcico, franco fina, mixta); Complejo Cerro del Chimango (Haplustol petrocálcico, arenosa, térmica); Complejo Cura Malal (Argiustol típico, limosa fina, mixta); Grupo Fuerte Argentino (Argiustol ácuico, franca fina, térmica); Grupo Arroyo Cura Malal Grande (Haplustol típico, franco fino, somero); Misceláneas Afloramientos rocosos.

Con el objetivo de cuantificar las pérdidas anuales de suelo para el área de estudio debido a incendios en la Cuenca del Arroyo Ventana e interpretar la vulnerabilidad edáfica por dichos eventos, se aplicó el modelo USLE (ver Ec. 1) a nivel geoespacial mediante el procesamiento de datos vectoriales, ráster y tabulares, aplicando técnicas de procesamiento digital de imágenes satelitales y de cartografía con el Software de código abierto QGis Madeira 3.4.6.

$$A = R * K * L * S * C * P \qquad \text{Ecuación 1}$$

donde: A= pérdida de suelo por erosión pluvial (Mg ha^{-1} $año^{-1}$); R = factor de erosionabilidad del aguacero (J cm m^{-2} h^{l}); K = factor de erodabilidad del suelo (Mg m^2 h ha^{-1} J^{-1} cm^{-1}); LS = factor topográfico, donde L: factor longitud de pendiente; S = factor de gradiente de pendiente; C = factor ordenación de cultivos; P = factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

A partir de un análisis de antecedentes y una consulta bibliográfica, el factor R adquirió un valor anual de 289,65 J cm m^{-2} h^{-1} para la zona de estudio (Gaspari, 2000).

Para la confección del mapa del factor K, se partió de datos provenientes de análisis de suelo, principalmente los referidos a la granulometría y al contendido de materia orgánica, y en función de las características propias de cada suelo. Esta información fue obtenida mediante el sitio web anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), previa consulta con las cartas de las series de suelos presentes en el área de estudio.

Las modificaciones del factor K tras un incendio forestal afectaría tanto a los componentes como a las propiedades del suelo que intervienen en su cálculo, por lo que sería necesario determinar esos factores sobre el suelo quemado para su posterior evaluación. Para ello, se consideró a Díaz-Fierros et al., (1994) que mostraron las posibles variaciones tras fuegos de tres intensidades diferentes (ver Tabla I). Los cambios que se produzcan en las propiedades edáficas, tras un incendio forestal, permiten medir la influencia del fuego en la susceptibilidad del suelo a la erosión determinada mediante este factor.

Tabla I. Variación relativa (1: ligera, 2: moderada, 3: fuerte), en función de la intensidad del incendio, de los factores necesarios para calcular el factor K de la USLE en la capa superficial del suelo modificada de Díaz-Fierros et al. (1994). Fuente: Benito et al. (2010).

Intensidad del fuego	**Partículas < 50 µm**	**M.O**	**Estructura**	**Permeabilidad**
Bajo	0	-1	+1	-1
Moderado	0	-1	+1	-2
Alto	-2	-3	-1	-2

 ISBN 978-987-1323-66-1

Para las zonas incendiadas, se recalculó el factor K, considerando la severidad, la cobertura y las características edáficas, como los factores determinantes, ajustados según la Tabla I. Por su parte, los valores de permeabilidad fueron considerados con valores relativos mayores para áreas boscosas por la incorporación de resinas al suelo, factor que aumenta la repelencia al agua, independientemente de la severidad registrada.

La zonificación de la pendiente (%), para definir el factor topográfico (LS), se estableció en base al Modelo Digital del Elevaciones (MDE) a partir de un recorte del archivo proveniente del MDE-Ar de la carta topográfica 3963-5 (IGN) y reclasificadas según Tabla II.

Tabla II. Valores de LS según rangos de pendiente. Fuente: Mintegui Aguirre (1988).

Pendiente (%)	Factor LS
< 3	0,3
3 - 12	1,5
12 - 18	3,4
18 - 24	5,6
24 -30	8,7
> 30	14,6

Con los datos de la información obtenida de datos a campo y a partir de una clasificación supervisada del área y análisis del índice de vegetación normalizada NDVI, se procedió a digitalizar y zonificar a los usos del suelo y generar la cartografía actual del factor C, según la clasificación de Mintegui Aguirre & López Unzú (1990) que se presenta en la tabla III.

Tabla III. Factor ordenación de cultivos (C) en la cuenca del Arroyo Ventana (Gaspari et al, 2009).

Uso de suelo	Valor de factor C
Pinar	0,001
Pinar incendiado	0,03
Pastizal	0,15
Uso agrícola	0,25
Matorral con buena cobertura	0.08
Roca en superficie	0,042

El valor del factor P se ajustó únicamente a cultivo agrícolas con prácticas conservacionistas, discriminado estos de acuerdo con la pendiente del terreno (Mintegui Aguirre y López Unzú 1990) y discriminados mediante observación y procesamiento digital de Imágenes de Google Earth.

El análisis temporal y la zonificación de las áreas incendiadas se realizó utilizando el servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov/). Se identificaron dos eventos de importancia y luego se procedió por fecha (previas y posteriores a los eventos), a la búsqueda y descarga de imágenes satelitales Landsat 8 (imágenes OLI) y Sentinel 2 que debido a sus características de resolución temporal, espectral y radiométrica resultan adecuadas para el estudio de variación de cobertura vegetal. Las imágenes se pre-procesaron con un sistema de información geográfica (SIG) mediante el software QGis 3.4.6. Madeira, con el cual se corrigieron atmosféricamente, obteniendo así valores de reflectancia. En función de incendios registrados en el área de estudio se realizó una previa zonificación

de severidades de incendios, según USGS, mediante índice dNBR (Diferencial de Proporción de Quema Normalizada) (Hunt Jr. & Rock,1989).

De acuerdo con las severidades y coberturas afectadas por los incendios se consideraron los nuevos valores de Factor C, aplicable para los primeros meses luego del evento considerando una "ventana de alteración" (Prosser& Williams, 1998). Asimismo, la zonificación de severidades se utilizó para estimar nuevos valores de Factor K, como se mencionó previamente.

Por último, los valores nuevos estimados fueron relacionados y comparados con los definidos según Pacheco et al. (2014), quien correlacionó valores de Factor C de USLE con valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) obteniendo un r^2= 0,99 (ver Tabla IV).

Tabla IV. Correlación entre NDVI y Factor C de la USLE. (Pacheco et al., 2014).

NDVI	FACTOR C
0	1
0,1	0,9
0,2	0,7
0,3	0,4
0,4	0,2
0,5	0,1
0,6	0,001
0,7	0,0001
0,8	0,00001
0,9	0,000001

El resultado final de la aplicación del modelo USLE se obtuvo procesando la cartografía de cada factor mediante el uso del QGis 3.4.6. Madeira, como se representa en la Fig. 2.

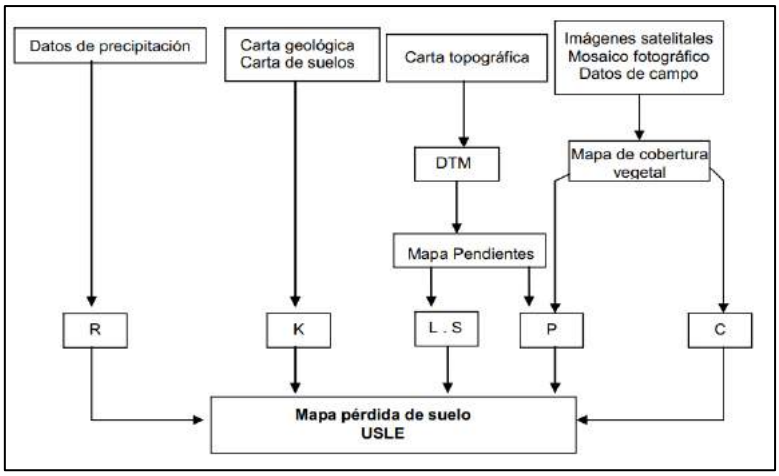


Figura 2. Secuencia de procesamiento para la zonificación de la pérdida de suelo. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Con la cartografía obtenida, se realizó una reclasificación para la evaluación de la degradación del suelo por erosión superficial, según rangos de la USLE (ver Tabla V) (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990), aplicada en la zonificación de la Cuenca del A° Ventana.

Tabla V. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial, según FAO, PNUMA y UNESCO.

Pérdida de suelo (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)	**Grado de erosión**
<10	Nulo o leve
10-50	Moderado
50-200	Alto
>200	Muy alto

Por último, se calculó la USLE para situaciones de incendios, estimando valores de factor K y C para sitios afectados por el fuego, categorizados estos según la cobertura afectada y la severidad calculada anteriormente. Se realizaron comparaciones con la situación actual (año 2020), con los de los eventos de incendios estudiados.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se han identificado dos eventos de incendios de gran magnitud ocurridos en la cabecera de la cuenca en los años 2014 y 2018, en los cuales se definió su severidad por análisis espectral.

En cuanto a los valores obtenidos para factor K en la Cuenca del A° Ventana ajustado a severidad por incendio, el mayor ocurre para severidades alto / muy alto, que ocupan gran parte de las superficies afectadas sobre afloramientos rocosos (ver Tabla VI). Es importante destacar que suelos de Series Bonete y SHCura Malal pasan de una categoría de moderada susceptibilidad a alta susceptibilidad para incendios de severidad alto / muy alto (aumento de 53% para la Bonete y un 51% para SH Cura Malal) según la clasificación de Soil and Water Conservation Society (1995) (>0,45 $Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$) Los incendios forestales causan mayor aumento de erodabilidad en comparación con incendios que afectan vegetación herbácea. En el caso de la Serie Bonete y SH Cura Malal Grande presentan un 10% más de aumento de Factor K, mientras que Erize, un 5%.

Tabla VI. Valores de Factor K [$Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$] luego de los incendios, según suelo, cobertura y severidad.

FACTOR K - INCENDIOS		**Severidad**		
Suelo (Factor K actual)	**Cobertura**	**Bajo**	**Moderado**	**Alto/ Muy Alto**
Roca (0,95)	**Arbóreo**	1	1	1
	Herbáceo	1	1	1
Erize (0,51)	**Arbóreo**	0,58	0,62	0,77
	Herbáceo	0,55	0,59	0,74
Bonete (0,32)	**Arbóreo**	0,37	0,41	0,52
	Herbáceo	0,34	0,37	0,49
SH Cura Malal (0,35)	**Arbóreo**	0,41	0,44	0,56
	Herbáceo	0,37	0,41	0,53

Se observa en la Fig. 3 que el factor C ha variado debido a la afectación de los incendios registrados. Se muestra como los sitios incendiados aumentan notoriamente el valor de Factor C (entre 0,7 y 1). Por otra parte, se destaca una disminución del valor en los pinares ubicados al sureste de la cuenca, que presentan gran regeneración post-incendio.

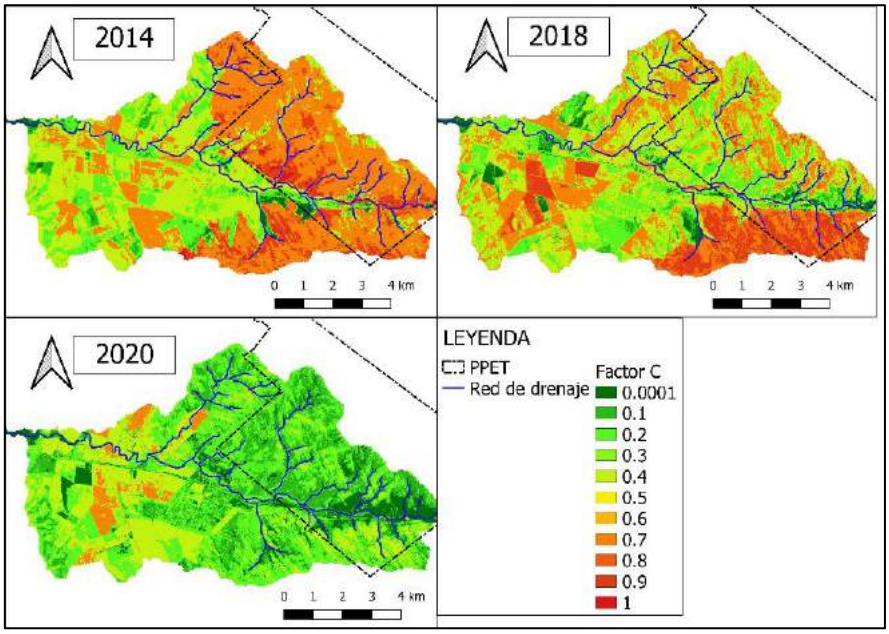


Figura 3. Factor de ordenación de cultivos (C): incendio de 2014, incendio de 2018, actual 2020.

Los resultados alcanzados de los cálculos de la USLE permitieron definir valores de pérdida de suelo superficial (A) (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) para la cuenca del A° Ventana en el año 2020 y para ambos eventos de incendios. En la actualidad se observan valores excesivos de pérdida de suelo, asociados a las zonas altas, donde las pendientes son pronunciadas, con altos valores de factor K (roca en superficie), de factor LS (pendientes muy marcadas) y factor C (coberturas que no amortiguan el impacto de la lluvia ni protegen suficientemente el suelo), representando el 30% de la cuenca, como categoría muy alto. (ver tabla VII).

Tabla VII. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial, según FAO, PNUMA y UNESCO.

Categoría	**Pérdida de suelo** (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)	**Área (ha)**	**Superficie de ocupación (%)**
Nulo o leve	<10	1.052	14
Moderado	10-50	2.100	28
Alto	50-200	2.038	27
Muy alto	>200	2.256	30

En la Fig. 4 se visualiza un aumento de la pérdida de suelo en las categorías alto y muy alto para los años en que se registraron incendios.

Se observan mayores valores de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial en los años donde se registraron incendios, habiendo variaciones de 10% para categoría nula, 5 a 10% para moderado y de hasta 15% para muy alto (ver Fig. 5). Los incendios vulneran la cobertura de pastizales y arbórea que regulan la erosión hídrica, bajo las cuales se destaca la categoría leve o nula. Las zonas incendiadas con alta severidad resultan desencadenantes de incrementos notorios de erosión hídrica superficial. Se destaca una mejoría de la categoría leve o nula en el año 2020, debido probablemente a regeneración de especies arbóreas y arbustivas.

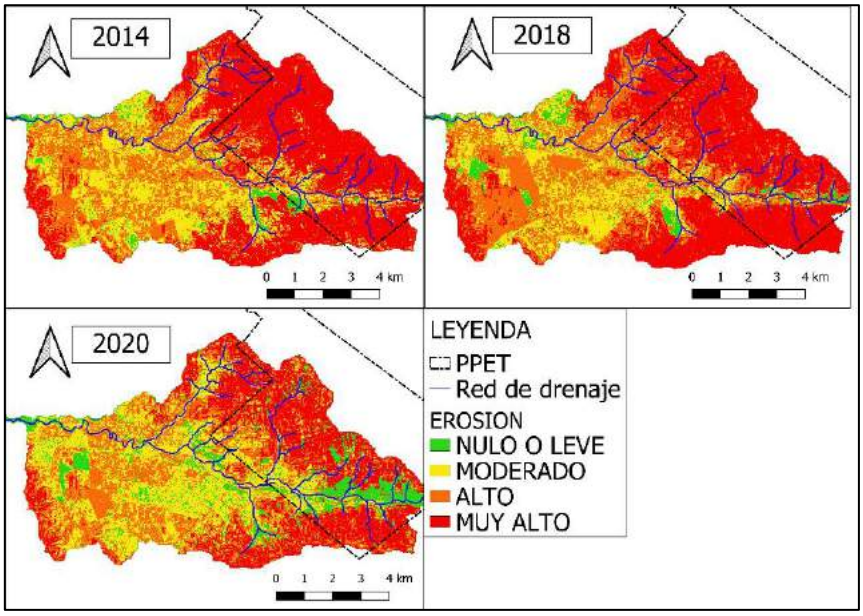


Figura 4. Pérdida de suelo (USLE): incendio de 2014, incendio de 2018, actual 2020.

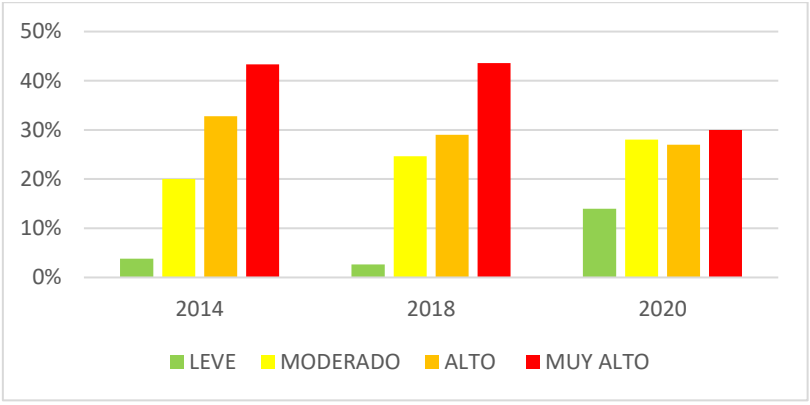


Figura 5. Pérdida de suelo (%) según años 2014, 2018 (con eventos de incendios) y 2020 (actual).

Se identifica que, independientemente de la severidad del incendio, los valores de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial para ambos eventos se clasifican como muy alto mayoritariamente en todas las superficies, siendo la categoría leve o nulo, casi inapreciable (ver Fig 6).

En las Figuras 7 y 8 se presenta la zonificación por diferencia de los tres momentos para cada evento. En ambas, la figura superior muestra la variación de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial entre los momentos previo al incendio y extintos estos. Por otro lado, la imagen inferior muestra la variación de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial entre los momentos una vez extintos los incendios y tiempo posterior, dando lugar a la recuperación de cobertura por parte del ecosistema, tanto por efectos de los incendios como condiciones climáticas.

La comparación de cantidades diferenciales entre momentos estudiados arrojó para ambos casos aumentos del orden de 1.000 a 3.000 Mg/ha.año luego del incendio, variando dichos valores según la pendiente, el suelo afectado y la cobertura incendiada, denotando que la interacción de dichos factores se relaciona con las severidades registradas (a mayor severidad, mayor pérdida de suelo). Asimismo, se observa que en sitios que no han sido incendiados también muestran un aumento considerable de pérdida de suelo, especialmente

por las condiciones climáticas que se registraron al momento de los incendios, representando peores coberturas de suelos o coberturas menos vigorosas.

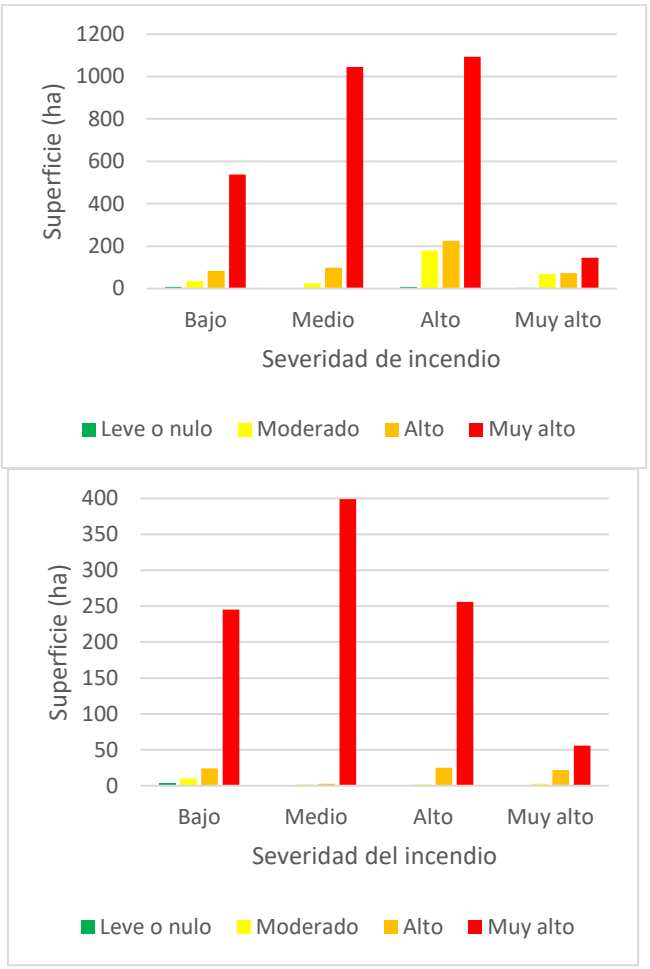


Figura 6. Severidad de los incendios en relación a la clasificación de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial para ambos eventos. Izquierda: Evento 2013 - 2014. Derecha: Evento 2018.

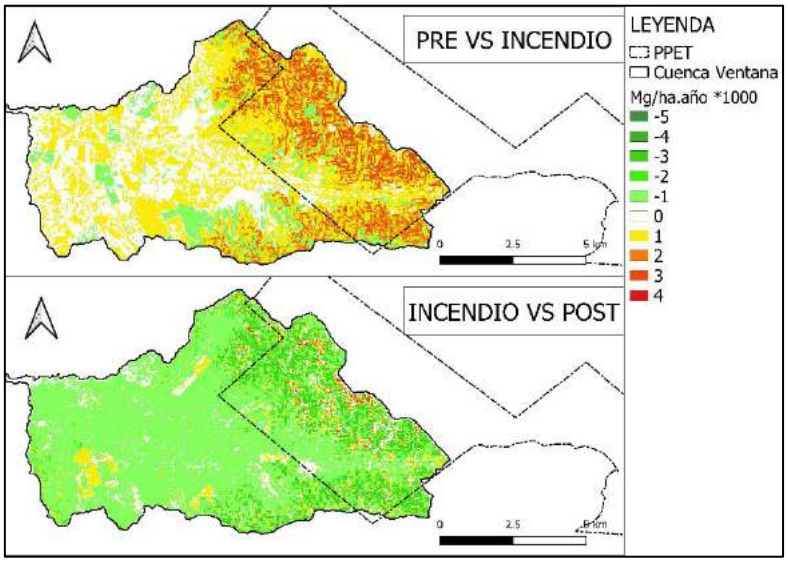


Figura 7. Diferencia de pérdida de suelo en miles de (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) para el evento 2013-2014. Superior: previo al evento y posterior al evento. Inferior: posterior al evento y tres meses luego de extinto el incendio.

Se observa la recuperación notoria que tiene el ecosistema a estos eventos, registrándose que entre los 3 y 6 meses posteriores a los eventos, los valores de pérdida de suelo disminuyen en el orden de los 2.000 a 4.000 Mg/ha.año, debido a la recuperación de la cobertura del suelo. Sin embargo, sitios que presentaban cobertura arbórea y fueron afectados por incendios severos, no se registraron dichos valores de recuperación.

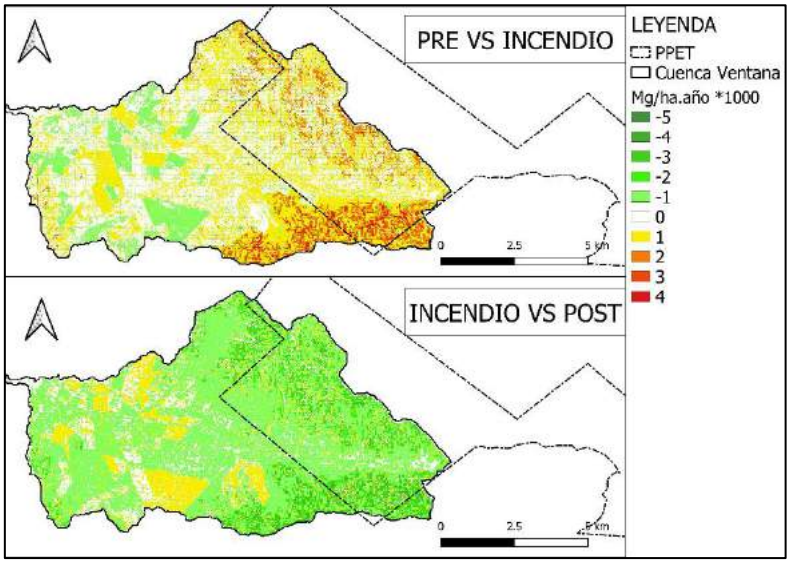


Figura 8. Diferencia de pérdida de suelo en miles de (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) para el evento 2018. Superior: previo al evento y posterior al evento. Inferior: posterior al evento y tres meses luego de extinto el incendio..

Por último, en la Figura 9 se observa la diferencia de valores registrados en los eventos, comparado con valores del año 2020, donde se registran diferencias en áreas incendiadas superiores a 2.000 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ de aumentos de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.

Como diferencia entre ambos eventos, además de las superficies afectadas, vale mencionar que en el año 2018 se alcanzan diferencias de hasta 4.000 Mg ha^{-1} $año^{-1}$, sobre todo en áreas de alta severidad. Asimismo, debe considerarse que el área incendiada en el año 2018 también lo fue en evento previo.

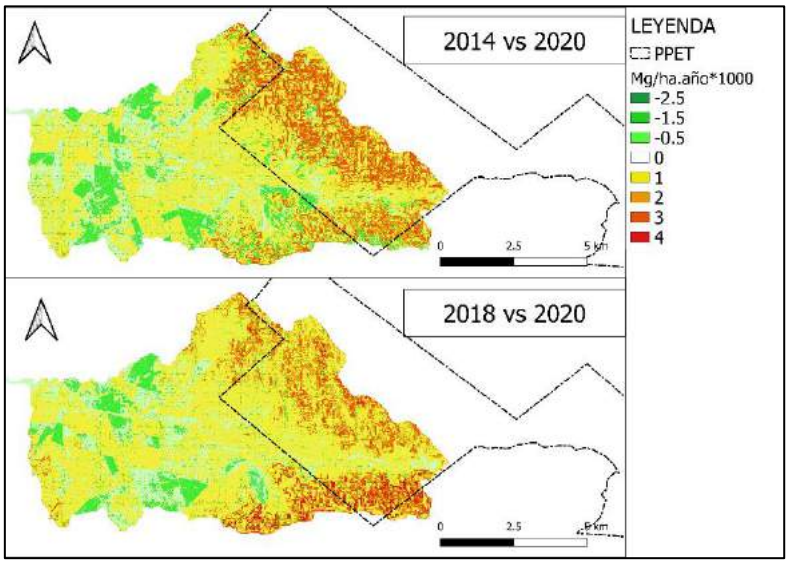


Figura 9. Diferencia de pérdida de suelo en miles de (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) luego de los eventos con la pérdida (2020).

Se expone claramente como la ocurrencia de incendios desencadena potenciales procesos erosivos en áreas incendiadas, donde se registran aumentos muy notorios de pérdidas de suelos anuales, todos clasificados como muy alto.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el grado de deterioro de los suelos en la cuenca del Arroyo Ventana, considerando el impacto causado por el empleo de sistemas basados en la agricultura permanente y gran proporción de suelos altamente erodables y el efecto de incendios de gran extensión. La erosión hídrica superficial actualmente supera los 50 Mg ha^{-1} $año^{-1}$ en el 58 % de la cuenca, favorecido por las elevadas pendientes, la gran proporción del suelo con roca en superficie y las coberturas herbáceas con poco recubrimiento.

Los resultados alcanzados constituyen una base de datos inédita, que debe ser validada por medio de parcelas experimentales en campo, logrando un ajuste de la metodología y aplicación de herramienta SIG-USLE, especialmente con el objetivo de ajustar modificaciones en los valores de factor K debido a incendios, como así también ajustar a un período determinado la ventana de alteración, la cual podría variar de acuerdo a la severidad del incendio, la cobertura afectada, el momento del evento y las condiciones climáticas.

Se concluye que los incendios abren una ventana de alteración en el ecosistema, donde se pueden desarrollar fuertes procesos degradativos por erosión hídrica superficial, especialmente ante eventos torrenciales. Sin embargo, vale la pena destacar la gran resiliencia que tiene este ecosistema, observando recuperación notoria de valores previos a incendios en términos de reverdecimiento y vigorosidad (justificado por valores de NDVI registrados). También se evidenció el importante rol que tienen los sitios forestales como reguladores hídricos y de protección de sitios altamente erodables de cuencas hidrográficas.

Los incendios desencadenan una mayor erodabilidad de los suelos afectados en sitios forestales que en pastizales, observando mayores severidades, pérdida de materia orgánica y fuerte impermeabilidad de los suelos, aumentando consecuentemente el escurrimiento superficial y la potencial pérdida de suelo ante eventos torrenciales. Si bien este ecosistema sin vegetación arbórea presenta una alta vulnerabilidad luego de los incendios, la ocurrencia de incendios forestales empeora dicha situación. Sería un desafío poder caracterizar si la erosión que evitan los bosques es mayor que la potencial que puede desencadenarse ante incendios.

Finalmente, se enfatiza el aporte significativo que tiene el uso de un SIG para estudios medioambientales con el objetivo de lograr una visión integrada de la situación ambiental y consecuentemente para el proceso de toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaria de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Benito, E., Cerda A., Soto B., Díaz Fierros F., Rubio J.L., Varela M.E. and Rodríguez-Alleres M. Métodos para el estudio de la erosionabilidad del suelo: su aplicación en suelos afectados por

incendios forestales. En: Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales, A. Cerda, A. Jordán (eds), Valencia, pp. 85-107. (2010).
Burgos, J. El clima de la provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. En: Flora de la Provincia de Buenos Aires. Colección Científica INTA. Ed. Cabrera A. L. Buenos Aires, pp. 33-100. (1968).
Caon, L., Vallejo V. R., Ritsema C.J. and Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. Earth-Science Reviews, 139, pp. 47-58. (2014).
Díaz-Fierros, F., Benito E. and Soto B. Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. En: Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires (M. Sala y J.L. Rubio, eds.). Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 163-176. (1994).
FAO-PNUMA-UNESCO. Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos. Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo de la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 79pp. (1980).
Frangi, J. and Bottino O. Las comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. La Plata: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestal, UNLP, t. 71, pp. 93-133. (1995).
Gaspari, F. J., Delgado M.I. and Senisterra G.E. Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense. Argentina, GeoFocus (Artículos), nº9, pp. 67-82. (2009).
Gaspari, F.J. Plan de Ordenamiento Territorial en cuencas serranas degradadas utilizando Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.). Tesis de maestría. Universidad Internacional de Andalucía Sede Iberoamericana de la Rábida. Huelva. España. 147 pp. (2000).
Harrington, H. Explicación de las hojas geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana, provincia de Buenos Aires. Buenos Aires: Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín 61, 43 pp. (1947).
Hunt Jr., E. R. and Rock B. N. Detection of changes in leaf wáter content using Near-and Middle Infrared reflectances. Remote Sensing of Environmnent, pp. 43-54. (1989).
Michalijos M. P. Estudio del riesgo de incendio forestal en un sector de la comarca de la sierra de la ventana utilizando geotecnologías. Tesis de doctorado en geografía. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 245pp. (2018).
Mintegui Aguirre, J. A. and López Unzu F. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 308 pp. Madrid. (1990).
Mintegui Aguirre, J. A. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud del declive en un terreno. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Madrid. pp: 2229-2245. (1988).
Prosser, I.P. and Williams L. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. Hydrol. Process., 12: 251-265 (1998).
Ramos Rodríguez, M.P. Manejo del Fuego. Ed. Félix Varela. La Habana, Cuba. 277 pp. (2010).
Shakesby, R. A. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. Earth Science Reviews, 105(3), pp. 71-100. (2011).
Vázquez, P. and Zulaica L. Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. Revista Párrafos geográficos, Vol 10, N° 2. pp. 242-267. (2011).
Wischmeier, W.H. and Smith D.D. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Handbook, No. 282, 47 p. (1965).
Wischmeier, W.H. and Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning Agriculture Handbook No 537. US Department of Agriculture, Washington, D.C.EE.UU. (1978).

ANÁLISIS DE PROVENIENCIA EN SECUENCIAS MESOZOICAS DE LA CORDILLERA CUTÚCU, REGIÓN SURORIENTAL DEL ECUADOR

Romero C. W.[ab], Condoy D.[a], Menéndez B. E.[c] y Gallardo O. A.[c]

[a]*Instituto de Investigación Geológica y Energética, IIGE, Ecuador*
[b]*Escuela Politécnica Nacional, EPN, Ecuador*
[C]*Univercidad Cental UC, Ecuador*

e-mail: wladimir.romero@geoenergia.gob.ec

RESUMEN

La cordillera de Cutucú se localiza al sur de la zona Subandina del Ecuador, corresponde a una zona corrida y plegada, que ofrece la posibilidad de estudiar diversas secuencias tanto de la cuenca Oriente como de la cordillera Real. En función del análisis estratigráfico, caracterización litológica, documentación de estructuras sedimentarias y análisis de minerales pesados, esta investigación presenta el análisis de proveniencia, es decir, la discriminación de la fuente de detrito en secuencias mesozoicas. En la unidad Piuntza (Triásico) se identificó el predominio de una fuente metamórfica heterogénea, dominada por pumpellita ± epidota y sillimanita ± granate. En la formación Santiago (Jurásico Inferior) se observa la atenuación de la fuente metamórfica y el dominio de una fuente ígnea básica caracterizada por olivino y augita. La formación Chapiza (Jurásico Superior) presenta un amplio domino de hornblenda, apatito, titanita y zircones euhedrales definiendo una fuente ígnea, intermedia. La formación Yaupi (Cretácico Inferior) es caracterizada por la presencia de olivino, augita y hornblenda, expresando una fuente ígnea básica. La formación Hollín (Cretacico Superior) constituye la base de la secuencia cretácica y es dominada por una fuente cratónica.

Palabras Clave: Análisis de minerales pesados, Cordillera Cutucú.

INTRODUCCIÓN

El principal rasgo morfológico de la margen noroccidental sudamericana (MNS) son los Andes. Al Este de los Andes ecuatorianos, la cordillera Real es un núcleo exhumado de rocas metamórficas paleozoicas e intrusivos mesozoicos deformados. El limite oriental de la cordillera Real es la zona sub Andina (ZSA), la cual, corresponde a un conjunto de fajas corridas y plegadas (*wedgetop*), que registra la tasa de exhumación de los Andes y a su vez proporciona información de las diversas secuencias sedimentarias de la cuenca Oriente (Ruiz et al., 2004; Gutierres et al., 2019). Se compone de Norte a Sur, del levantamiento Napo, la depresión Pastaza y las cordilleras Cutucú y Cóndor.

En la cordillera del Cóndor, Litherland et al., (1994), reporto a la unidad Piuntza como una secuencia de calizas y lutitas calcáreas deformadas intercaladas con areniscas, brechas volcánicas, y andesitas basálticas; en función de su registro fósil fue asignada al Triásico (Ivimey-Cook and Morris, 1989). Sin embargo, Drobe et al., (2013) incluye en esta unidad a las rocas volcánicas y volcano-clásticas afectadas por la intrusión del batolito de Zamora.

En la cordillera Cutucú, la Formación Santiago fue asignada al Jurásico Inferior (Ivimey-Cook and Morris, 1989) y consiste en: calizas negras, lutitas y areniscas

calcáreas con la presencia de facies volcánicas (Tschopp, 1953); sobreyaciendo en discordancia se observa a la Formación Chapiza del Jurásico Medio a Superior (Litherland et al., 1994), que incluye: *red beds*, conglomerados, areniscas y limolitas rojas continentales (Jaillard et al., 1997). En función al análisis de datos estructurales e imágenes satelitales Christophoul, et al., (1998) afirma que la cordillera Cutucú se compone de Este a Oeste, de un gran pliegue anticlinal desarrollado en las formaciones Santiago y Chapiza, "ver Fig.1".

Desde otro punto de vista, en función del análisis palinológico Gaibor et al., (2008), reporta un carácter marino somero para la base de la formación Santiago (Miembro Rio Santiago), mientras que en la parte superior (Miembro Patuca) se observan un importante aporte continental, indicando una somerización del ambiente de depósito (Romeuf, 1994). A partir de datos bioestratigráficos, Ordoñez, (2006) reporta ambiente costero para la base de la formación Chapiza mientras que para el tope reporta ambiente continental seco a calido. Jaillard et al., (1997) se refiere a niveles volcánicos y volcanoclásticos en el tope de formación Chapiza como la formación Yaupi "ver Fig.1".

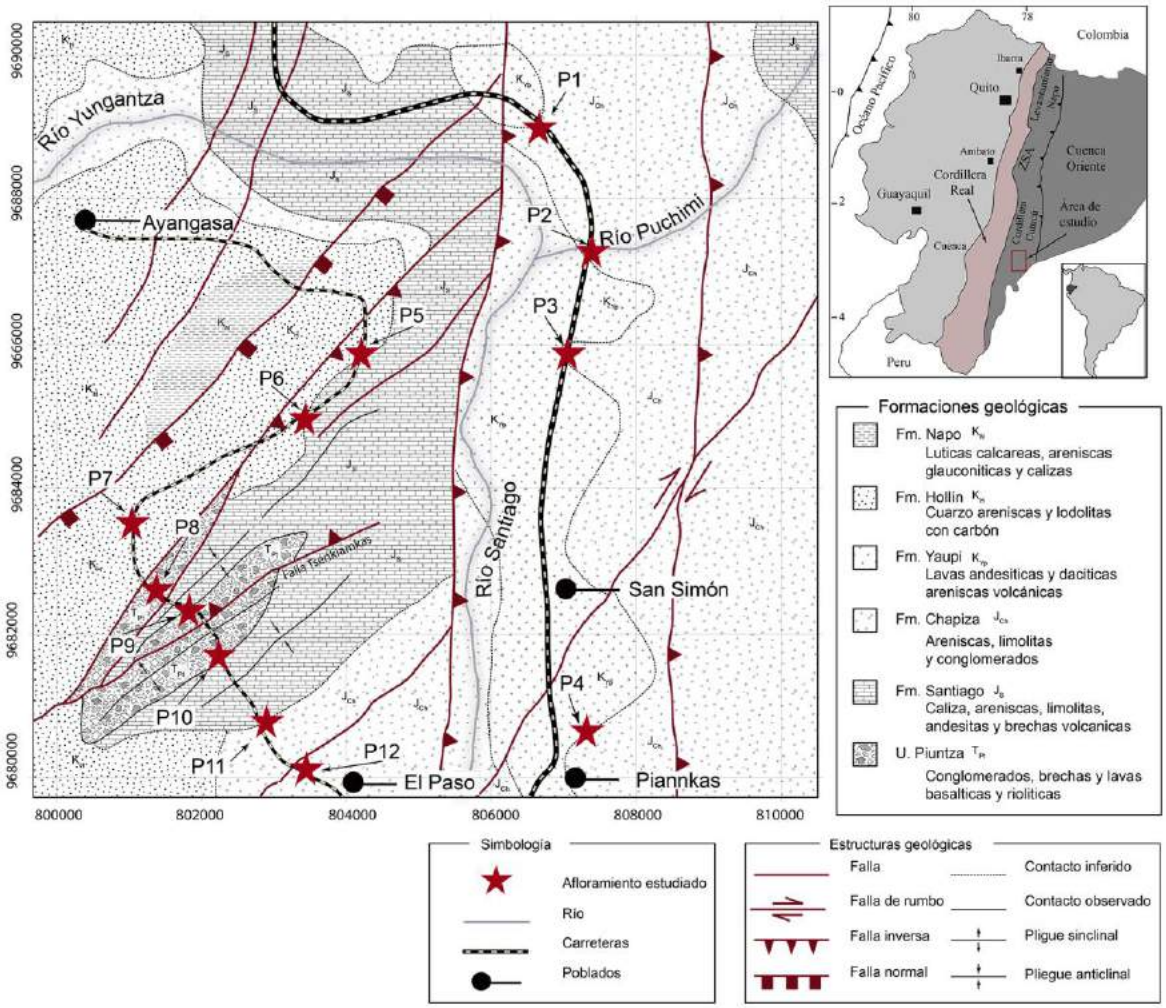


Figura 1. Mapa geológico de la zona de estudio

En discordancia angular sobre un relieve heterogéneo, deformado y peneplanizado, se deposita la formación Hollín; en su base compuesta por conglomerados de cuarzo y cuarzoareniscas (miembro Inferior) e intercalaciones rítmicas de areniscas y lutitas con influencia de mareas (miembro Superior) en su tope.

Dentro de este contexto las relaciones estratigráficas de diversas secuencias que afloran en la cordillera Cutucú no han sido directamente observadas en campo, ni se han analizado tendencias de apilamiento vertical, además se desconoce su procedencia. Esta investigación presenta la caracterización litológica, documentación de estructuras sedimentarias, relaciones estratigráficas y análisis de proveniencia en función a la cualificación y cuantificación de minerales pesados, en secuencias mesozoicas que afloran en el flanco occidental de la cordillera Cutucú, en la vía Patuca a Piankas "ver Fig.1".

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El levantamiento de información geológica en campo incluyo: la caracterización litológica, reconocimiento y documentación de estructuras sedimentarias, medición de espesores, documentación de superficies de erosión y recopilación de datos estructurales. Con el fin de complementar la cartografía geológica, se realizó el análisis estructural a partir de imágenes satelitales de alta resolución de la zona de estudio.

La documentación de superficies de erosión tomo en cuenta los parámetros jerárquicos descritos en Tedezco et al., (2010). En la medición de paleo-corrientes se consideró estructuras sedimentarias de transporte como son imbricación y sets con estratificación cruzada, en lo posterior, siguiendo a Tucker, (2009) los datos fueron clasificados mediante una media geométrica estadística. En la discriminación de secuencias se consideró el concepto de asociación de facies utilizando la metodología descrita a detalle en James y Dalrymple, (2010) y consideramos el termino facie definido por Walker, (1990) como un cuerpo de roca caracterizado por una particular combinación de litologías, estructuras físicas y biológicas que le confieren un aspecto diferente a los cuerpos de rocas adyacentes dentro de una secuencia continua. La georreferenciación de afloramientos tipo y la medición de espesores de secuencias se realizó con la ayuda de GPS diferencial (GPS Trimble GeoXT 2008-Series) y en el procesamiento de datos se utilizó ArcPad 8. Una vez caracterizada cada secuencia, se procedió con el muestreo sistemático de afloramientos tipo en cada secuencia.

Para el análisis de minerales pesados, se recolectaron 5Kg por muestras, cada roca fue triturada y tamizada en húmedo, se trabajó con un tamaño de grano de entre 63 a 350 micras, además, la fracción orgánica fue disuelta en ácido acético al 10%, mientras que, la fracción calcárea se disolvió en ácido clorhídrico al 20%. La fracción libre de carbonatos y materia orgánica fue decantada en politungstato de sodio a una densidad de 2.9g/cm^3.

El conteo de minerales se realizó en montajes de piperina (índice de refracción 2.67) bajo el microscopio petrográfico, siguiendo la metodología propuesta por Winkler, (1988). considerando a Mange, (2012) se contaron estadísticamente alrededor de 300 granos en cada muestra. Este número proporciona una estimación confiable de las proporciones de frecuencia de los diversos minerales pesados (Morton, 2007)

RESULTADOS

En la tabla I se presenta los resultados estadísticos del análisis de minerales pesados, incluyendo coordenadas de afloramientos y nomenclatura de las faces minerales estudiadas. El índice ZTR fue utilizado para cuantificar la madures del detrito (Ruiz, et al., 2007) y los índices apatito vs circón (A/Zrn) y circones euhedrales vs circones (Zrne/Zrn) para observar el comportamiento de la fracción ígnea a través del tiempo (Dickinson, 2007).

Tabla I. Resultados de los análisis de proveniencia en minerales pesados

Unidad/ Formación		Fm. Hollín			U. Yaupi		Fm. Chapiza				Fm. Santiago						U. Piuntza		
											Mmb. Puchimí		Mmb. Patuca		Mmb. Yuquianza				
Muestra		P7-02	P7-01	P6-03	P2-04	P1-06	P4-01	P3-01	P12-01	P1-01	P6-02	P6-01	P5-05	P11-02	P5-04	P6-03	P10-01	P8-02	P9-01
WGS-84; 17S		806685E 9689079N	807389E 9687295N	807086E 9685833N	807301E 9680608N	804192E 9685800N	803464E 9684924N	801050E 9683501N	801430E 9682559N	801827E 9682245N	802290E 9681616N	802869E 968072N3	803464E 9680045N	806685E 9689079N	807389E 9687295N	807086E 9685833N	807301E 9680608N	804192E 9685800N	803464E 9684924
Zircon	Zrn	142	121	116	25	24	70	69	66	60	20	23	70	63	52	88	70	129	111
Turmalina	Tur	6	11	9	23	23	24	26	28	28	19	14	40	77	62	46	43	65	120
Rutilo	Rt	11	9	12	20	20	24	23	22	23	21	17	92	61	42	31	25	71	34
Monazita	Mnz	21	19	20	15	13	16	18	14	13	26	21	20	41	22	15	10	10	15
Brookita	Brk	15	12	17	18	20	23	24	25	31	20	14	31	30	22	13	7	0	0
Anatasa	Ant	12	15	13	15	13	10	6	6	7	14	7	95	114	126	114	121	32	40
Titanita	Ttn	10	9	10	7	6	4	9	12	10	10	7	20	18	14	20	25	29	22
Apatito	Ap	32	36	20	48	37	36	34	30	32	38	42	5	10	20	28	20	55	46
Pumpellita	Pmp	4	3	1	5	6	7	2	4	7	6	5	2	24	38	25	18	42	43
Epidota	Ep	0	0	0	6	5	5	2	1	2	3	7	16	28	26	25	35	74	74
Clinozoisita	Czo	0	0	3	6	1	2	3	2	1	8	13	34	6	28	20	17	26	28
Cloritoide	Cld	1	2	5	6	5	6	8	5	5	9	9	0	26	30	31	37	81	96
Zoisita	Zo	0	0	0	2	4	2	4	6	11	2	9	0	0	0	0	0	71	59
Sillimanita	Sll	2	4	1	0	0	0	0	0	0	9	10	0	0	0	53	73	0	0
Granate	Grt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	55	68	114	111	23	43
Olivino	Ol	0	0	0	12	10	0	0	0	0	0	0	5	37	42	51	55	13	15
Augita	Aug	7	17	24	37	53	19	24	29	23	18	23	38	65	74	81	70	45	22
Hipersteno	Hyp	1	2	2	8	8	11	0	0	2	12	14	97	130	126	103	115	45	40
Horblendas	Hbl	8	18	24	29	32	15	13	11	13	22	25	900	900	900	900	900	900	900
Casiderita	Cst	26	23	24	18	20	25	33	39	32	43	42	0	0	0	0	0	0	0
Total		300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

 ISBN 978-987-1323-66-1

Unidad Piuntza (TPt)

En el flanco SO del rio Santiago, la unidad Piuntza aflora en el núcleo de un pliegue anticlinal volcado al SE y afectado por la falla Tsenkiamkas, inversa, de orientación NE y buzamiento al NO "ver Fig. 1".

La base de la secuencia se compone de conglomerados, oligomícticos, con clastos de chert, cuarzo azul, cuarcitas y fragmentos andesíticos. La parte media de la secuencia es dominada por limolitas con clastos volcánicos y tobas de cristales de color gris y rosado. Hacia el tope se observan intercalaciones de brechas volcánicas, matriz soportada, mal sorteadas, con abundantes fragmentos de andesitas y andesitas basálticas "ver Fig. 2A". La dirección de paleocorrientes indica transporte detrítico en dirección Sur-Sureste "ver Fig. 3".

Con respecto a la composición modal de minerales pesados se analizaron tres muestras: P10-01; P8-02; P9-01. Se observan fracciones dominantes de: Pmp ± Ep (16% - 17.5%), Sll ± Grt (16% - 19%), Cld ± Czo ± Zo (16% -18.4%), en menor proporción se observa Ap ± Ttn ± Cst (11%-14%), Aug ± Hyp (11.7% - 12%), Mnz ± Brk (8%-9.5%), Hbl (5.4%-6.5%) y Ol (4.1% - 5%) "ver Tabla 1 y Fig. 3". El índice de madurez ZTR es inferior a 5% y se mantiene constante. El índice Ap/Zrn presenta una tendencia creciente, desde 1.4 a 3.1; finalmente, en el índice Zrne/Zrn también se observa una tendencia creciente de 0.3 a 0.6 "ver Fig. 3".

Interpretación

Las proporciones de Pmp, Ep, Grt, Sll, Cld, Czo, Zo indican una fuente metamórfica dominante. La Pmp es un mineral indicativo de bajo grado metamórfico, común en rocas metapeliticas, pizarras y filitas (Garzanti and Andó, 2007); mientras que en asociación Sll y Grt son minerales marcadores de alto grado metamórfico, esta consideración indicaría que la fuente metamórfica fue heterogenia tanto en su litología como en su grado metamórfico (Nie, et al., 2012).

Las proporciones de Aug, Hyp, Hbl y Ol indican una fuente ígnea. El Ol es indicador de composición ultrabásica a básica (Smale, 2007). La presencia de Zrn redondeados, de alta esfericidad, indicaría que existe una fuente crónica, sin embargo, los Zrn podrían ser heredados de una fuente más antigua. La presencia de Ap, Ttn y Cst en morfologías euhedrales indica que rocas afectadas por hidrotermalismo fueron parte de la fuente detrítica. La tendencia creciente en los Ap/Zrn y Zrne/Zrn, indican la influencia de una fuente volcánica (Yaneva, 2004).

Formación Santiago (JS)

La formación Santiago descansa en discordancia sobre la unidad Piuntza "ver Figs. 1 y 2A". En la base de esta secuencia se observan intercalaciones estratificadas de calizas mudstone, wackstone y lutitas calcáreas con abundantes fósiles (Miembro Río Santiago; "ver Fig. 2B"). La parte media de la formación Santiago está compuesta por finas intercalaciones de areniscas masivas y lutitas calcáreas, con tendencia estratocreciente (Miembro Yuquianza; "ver Fig. 2C"). En discordancia se observan brechas volcánicas, andesitas, andesitas volcánicas, peperitas y areniscas volcánicas con microslumps, clastos soportados y gradación inversa (Miembro Patuca). El tope de la formación Santiago es caracterizado por potentes estratos de lodolitas negras con carbón y abundantes bivalvos y amonites, cubiertas en concordancia por intercalaciones de areniscas con estratificación cruzada (Miembro Puchimi; "ver Fig. 2D"). En el miembro Yuquianza las paleocorrientes presentan un carácter bimodal, Noroeste-Suroeste,

mientras que, para el miembro Patuca paleocorrientes indican una dirección de transporte desde el Oeste hacia el Este “ver Fig. 3”.

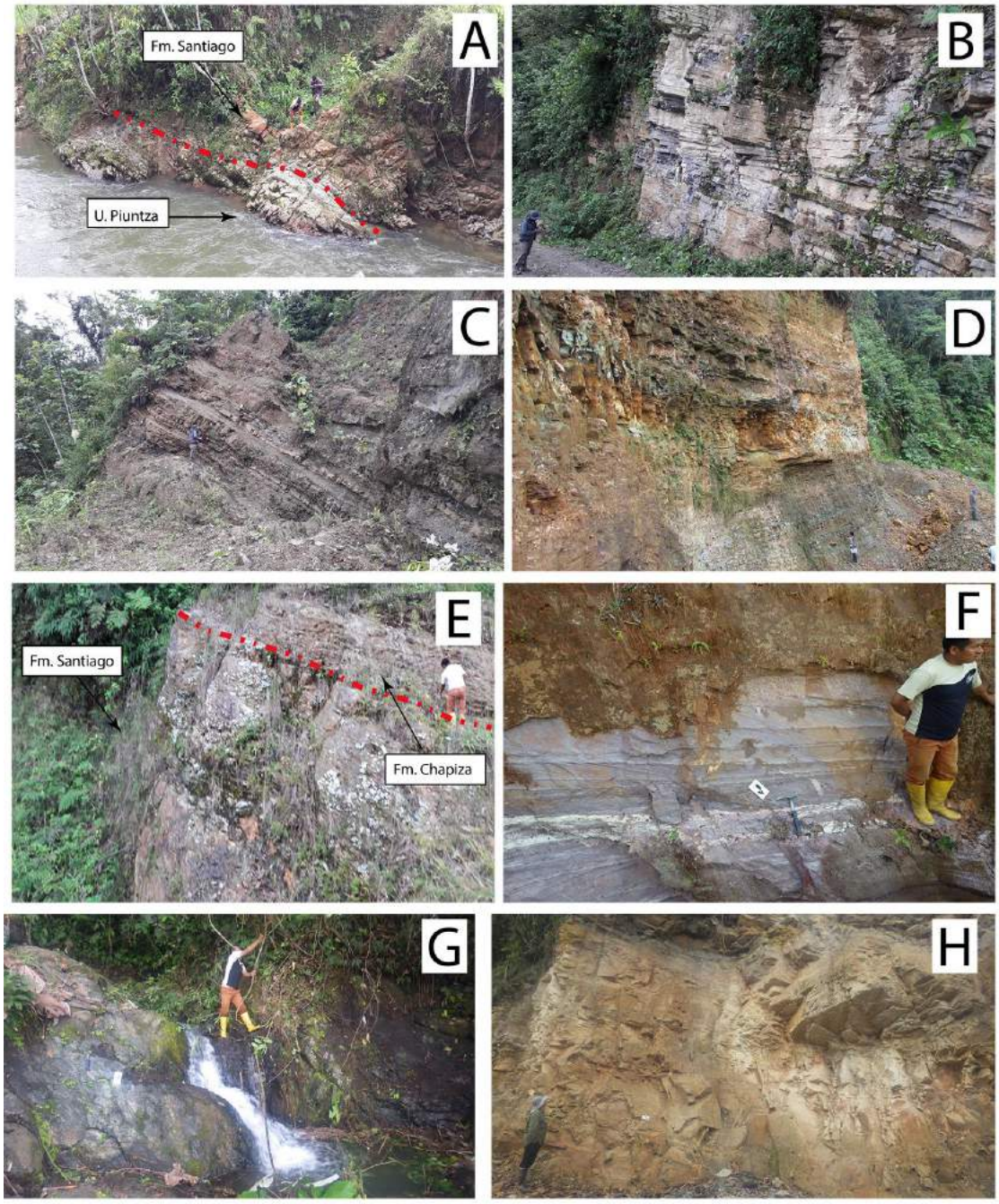


Figura 2. Afloramientos tipo
A. Contacto discordante entre la U. Piuntza y Fm. Santaigo (P9); **B.** Paquetes de calizas estratificadas del Mmb. Río Santiago, Fm. Santiago (P10); **C.** Finas intercalaciones de areniscas y lutitas, del Mmb. Yuquianza, Fm. Santiago (P11); **D.** Areniscas y conglomerados del Mmb. Puchimi, Fm. Santiago (P5); **E.** Discordancia entre la Fm. Santiago y la Fm. Chapiza (P6); **F.** Redbed y niveles de yeso de la Fm. Chapiza (P12); **G.** Volcanoclastos de la U. Yaupi (P2); **H.** Areniscas de la Fm. Hollín (P7).

Se analizaron seis muestras de la formación Santiago, en el miembro Rio Santiago, no se encontraron asociaciones de minerales pesados que puedan definir una fuente. Las muestras P6-03 y P5-04 corresponden al miembro Yuquianza; P11-02 y P5-05

pertenecen al miembro Patuca y las muestras P6-01 y P6-02 al miembro Puchimi,"ver Fig. 3".
En el miembro Yuquianza se observan fracciones de: Mnz ± Brk ± Ttn (16.1%-18.8%), Grt ± Sll (16.8% - 17.1%), Cls ± Czo ± Zo (15.7% -16.1%), en menor proporción se observan fracciones de Ap ± Cst (8.6%-8.9%), Pmp ± Ep (7.5% - 9.3%), Aug ± Hyp (4% - 6.5%), Hbl (2.4%-5%). El índice de madurez ZTR va de 22.6% a 24.3%; el índice Ap/Zrn se observa tendencia decreciente, de 1.8 a 1.1; finalmente, para el índice Zrne/Zrn se observa una tendencia constante con un valor de 2.1, "ver Tabla 1 y Fig. 3".
En los miembros Patuca y Puchimi se observan fracciones de: Ap ± Cst (24.1%-26.25%), Aug ± Hyp (10.2% - 18.4%), Mnz ± Brk ± Tnt (9.43%-23.9%); en menor proporción se observan fracciones de Hbl (7.2%-9%), Cld, ± Czo ± Zo (6.3% -10.2%), Pmp ± Ep (3% - 5%) y Grt ± Sll (2.8% - 4.1%), "ver Tabla 1 y Fig. 3".
El índice de madurez ZTR muestra una tendencia creciente desde 13.2% a 19.91%; el índice Ap/Zrn presenta tendencia decreciente, desde 6.9 a 0.5. Finalmente, para el índice Zrne/Zrn se observa una tendencia ligeramente decreciente de 0.59 a 0.45, "ver Fig. 3".

Interpretación

El miembro Rio Santiago es interpretado como una plataforma calcárea somera, mientras que el miembro Yuquianza es asociado a ambientes turbiditicos (Gaibor, et al., 2008). El miembro Patuca expresa un volcanismo intracuenca, subareal, coetáneo a la sedimentación de ambientes deltaicos expresados por el miembro Puchimi (Romero, et al., 2019).
El índice ZTR en asociación con las altas proporciones de Mnz, Brk, Ttn indican un incremento en el aporte cratónico (Garzanti and Andó, 2007). Mientras que, proporciones de Grt, Sll, Cld, Czo y Zo, presentes en el miembro Yuquianza indican que la fuente metamórfica presente en la unidad Piuntza continúa erosionándose posterior al fin de la sedimentación calcárea (miembro Río Santiago). La disminución de las proporciones de Aug, Hyp y Hbl, junto a la ausencia de Ol indican que la fuente ígnea básica se atenuó después del fin de la sedimentación calcárea. Esta observación coincide con el decrecimiento del índice Ap/Zrn.
En la parte superior de la formación Santiago, en asociación el índice Ap, Cst, junto al índice Aug, Hyp indican un dominio de una fuente ígnea (Garzanti and Andó, 2007). Mientras que las bajas proporciones de Cld, Czo, Zo, Pmp y Ep indican que la fuente metamórfica se atenuó después del volcanismo intracuenca expresado en el miembro Patuca.

Formación Chapiza

La formación Chapiza descansa en discordancia sobre la formación Santiago, "ver Fig. 2E". La base de la secuencia es caracterizada por areniscas canalizadas, finas a medias con estratificación cruzada, gradación normal, y ripples de corrientes intercaladas entre gruesos paquetes de limolitas arenosas rojas. La parte media de la secuencia se caracteriza por la presencia de niveles de yeso y anhidrita, "ver Fig. 2F". El análisis de paleocorrientes indica una dirección de transporte hacia el Noreste, "ver Fig. 3".

Con respecto a las proporciones de minerales pesados se observan un alto índice ZTR (37.3% - 39.6%) de tendencia creciente acompañado por altas proporciones de Ap ± casiderita (20.4%-22.9%), Mnz ± Brk ± Ttn (17.8%-20.1%), con bajas proporciones de

Aug ± Hyp (7.96% - 10%), Hbl (3.6%-5.11%), Cld, ± Czo ± Zo (3.41% -5.8%) y Pmp ± Ep (1.5% - 4%), “ver Tabla 1 y Fig. 3”.

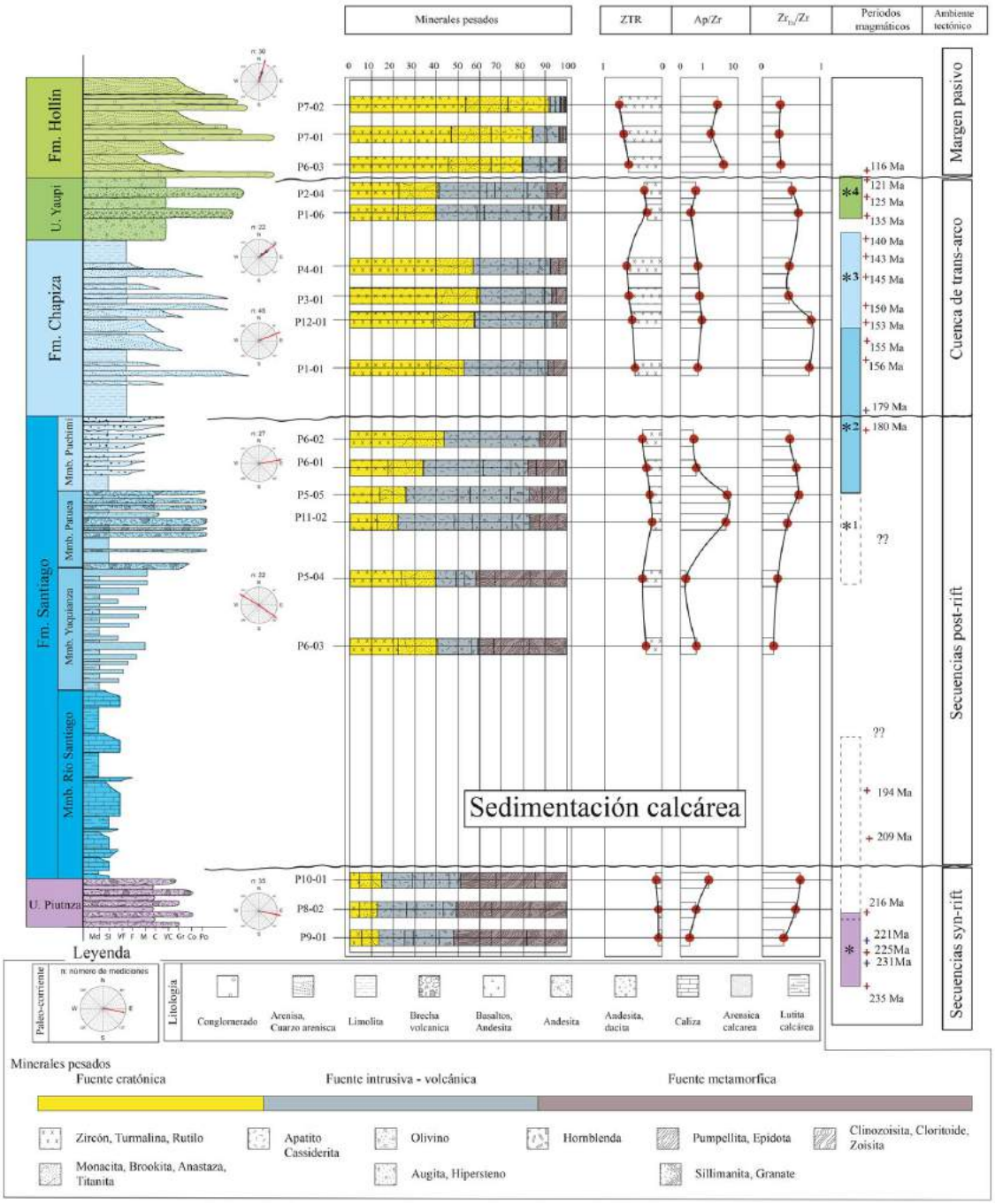


Figura 3. Análisis de proveniencia en minerales pesados.

El comportamiento del índice Ap/Zrn marca una tendencia regular en 0.5; mientras que el índice Zrne/Zrn presenta una tendencia decreciente hacia el tope de la formación Chapiza con un valor que va desde 0.88 a 0.43, “ver Fig. 3”.

Interpretación

El ambiente de depósito propuesto para la formación Chapiza corresponden a planicies aluviales de ríos meandricos en la base y llanuras de inundación hacia el tope.

El alto índice de ZTR y las altas proporciones de Mnz, Brk y Ttn indican un dominio cratónico para la formación Chapiza. Mientras que la presencia de Ap, Cst, Aug, Hyp y Hbl indican la presencia de una fuerte ígnea (Garzanti and Andó, 2007). Es notorio las bajas proporciones de índices metamórficos como son: Cld, Czo, Zo, Pmp y Ep, esto indica la atenuación de la fuente metamórfica en la formación Chapiza.

Formación Yaupi

La formación Yaupi descansa en concordancia sobre la formación Chapiza, consiste en conglomerados de cuarzo, lutitas con clastos volcánicos, lodolitas con materia orgánica, areniscas limosas con ripples de corriente, y niveles volcánicos de andesitas basálticas, andesitas, dacitas, riolitas y tobas de cristales, es común observar brechas volcánicas polimigticas, entre niveles volcánicos, "ver Fig. 2G".

Se observan altas proporciones de Ap ± Cst (20.4%-22.9%), Mnz ± Brk ± Ttn (17.8%-20.1%), con menores fracciones de Aug ± Hyp (15% - 20.5%), Hbl (9.6%-10.6%), Ol (3.3% - 3.9%) y bajas proporciones de Cld, ± Czo ± Zo (3.1% -4.7%) y Pmp ± Ep (3.8%) "ver Tabla 1 y Fig. 3".

El índice ZTR es alto (22.3% - 22.8%) y presenta una tendencia ligeramente creciente. El comportamiento del índice Ap/Zrn marca una tendencia ligeramente creciente con valores de 1.6 a 1.9; mientras que el índice Zrne/Zrn presenta una tendencia ligeramente creciente con valores de 0.5 a 0.7 "ver Fig. 3".

Interpretación

El ambiente de depósito de la formación Yaupí está vinculado a depósitos aluviales con la presencia de un arco volcánico activo. Las proporciones de ZTR, Mnz, Brk, Ttn son altas, lo que indica un componente cratónico estable, mientras que en conjunto las proporciones de Aug ± Hyp, Hbl y olivino indican la presencia de una fuente volcánica dominante (Garzanti and Andó, 2007).

Formación Hollín

La Formación Hollín representa la base de la secuencia cretácica; descansa en discordancia angular sobre un basamento heterogéneo y deformado compuesto tanto por la unidad Piuntza, las formaciones Santiago, Chapiza y Yaupi. En este trabajo se identificó y documento el miembro inferior de la Formación Hollín, en el cual se observan: conglomerados de cuarzo, con gradación normal, estratificación cruzada, cuarzo-areniscas de grano grueso a medio con estratificación cruzada transversal y paralela y areniscas limosas masivas con clastos de carbón, organizados en tendencias estratodecrecientes, "ver Fig. 2H".

En la fracción pesada se observan altas proporciones de Ap ± Cst (19.4%-19.6%), Mnz ± Brk ± Ttn (18.4%-19.8%), con menores cantidades de Aug ± Hyp (2.6% - 8.5%), Hbl (2.6%-8.11%), Cld, ± Czo ± Zo (0.4% -2.5%) y Pmo ± Ep (0.3%-1.4%) y Sll ± Grt (0.4% -1.2%) "ver Tabla 1 y Fig. 3". El índice ZTR es muy alto (45.6% - 53.4%) y presenta una tendencia marcadamente creciente. El comportamiento del índice Ap/Zrn marca una tendencia decreciente con valores que van desde 0.3 a 0.1; mientras que el índice Zrne/Zrn presenta una tendencia semiconstante en 0.31 a 0.27, "ver Figura 3".

Interpretación

El ambiente de depósito del miembro inferior de la Formación Hollín corresponde a planicies aluviales de ríos trenzados de baja sinuosidad. Las altas proporciones de ZTR, Mnz, Brk y Ttn, indican la presencia dominante de fuente cratónica, mientras que en

conjunto las proporciones de Aug, Hyp y Hbl indican la presencia de una minoritaria fuente volcánica (Garzanti and Andó, 2007).

DISCUSIÓN

Diferentes autores han reportado edades de magmatismo en la MNS, en específico en Ecuador, Cochrane, (2013) y Spikings, et al., (2015) reportan edades U/Pb de circones: 235 ± 1.5Ma; 234.09Ma; 233,7±0.8Ma; 231±1.9Ma; 229.3±2.4Ma, los autores sugieren que en el Triásico Superior y asociado al desmontaje de Panguea, se produjeron procesos de anatexis cortical y *underplating* magmático. En la actualidad el registro de estos eventos puede ser observado al Oeste de la zona de estudio, en la cordillera Real, el terreno Loja, está compuesto por metapelitas, filitas y cuarcitas de la unidad Chiguinda, granitos tipo S de la unidad Tres Lagunas, anfiboltias y diques ultramáficos de la unidad Monte Olivo y gneis, cuarcitas y filitas de la unidad Agoyan. Litherland, et al., (1994) indica que la mineralogía de la unidad Chiguinda es dominada por Pmp, Qz, Ser y Ep. Mientras que en la unidad Tres Lagunas es frecuente encontrar altas proporciones de Qz azul y Sll. Por otro lado, la unidad Monte Olivo es dominada por Aug, Hbl, Chl y Ol (Aspend y Litherland, 1992).

Bajo las consideraciones descritas anteriormente, y considerando el registro de minerales pesados documentado en la unidad Piuntza (Pmp, Ep, Grt, Sll, Cld, Czo, Zo, Aug ± Hyp; Hbl y Ol), y que las direcciones de paleocorrientes que indican un transporte de sedimento desde el Oeste hacia el Este, la fuente de detrito de la unidad Piuntza podrían estar relacionadas a rocas del terreno Loja. Dentro de este contexto, la unidad Piuntza representaría una secuencia syn-rift, asociada al rompimiento de Panguea en el Triásico Superior, estudiada ampliamente en la MNS por Spikings, et al., (2015).

El siguiente pico magmático reportado agrupa los batolitos Jurásicos de: Zamora, Rosa florida y Abatigua, su componente extrusivo fue denominado formación Misahuallí, que incluye a rocas volcánicas: andesitas y dacitas. de composición calcoalcalina, asociado directamente a procesos de subducción (Litherland, et al., 1994). Drobe, et al., (2013), Cochrane, (2013), Spikings, et al., (2014), reportan edades U/Pb en circones: 180 ± 0.5Ma; 179 ± 1.3Ma; 156.2 ± 1Ma; 155.9 ± 4.3Ma; 153.1 ± 1.3Ma; 146.7 ± 4.3Ma; 145.47±6.2Ma; 143.47 ± 0.3Ma; 140.7±1.7Ma.

El registro detrítico de este ciclo magmático y su expresión extrusiva está presente en el tope de la formación Santiago (miembro Patuca y Puchimi) y en la formación Chapiza, en donde existe un predominio de una fuente ígnea; el análisis de paleocorrientes indica una dirección de transporte de sedimentos desde el Oeste al Este. Sin embargo, la fracción pesada en el miembro Patuca, contiene fracciones de Ol y Aug, estas fracciones no son observadas en la formación Chapiza, la cual, contiene importantes proporciones de Hbl, Ttn, Ap y Zrn euhedrales. Por esta razón, la fuente ígnea observada en la fracción de minerales pesados, presente en las formaciones sedimentarias Jurásicas podría ser diferenciada. El Ol es un mineral indicativo de magmatismo básico mientras que proporciones de Hlb y Ttn caracterizan a firmas intermedias. Por otro lado, en el Jurásico Superior se observa un incremento de un input cratónico que evoluciona hacia el Cretácico.

La evolución y el predominio de la fuente crónica en el Jurásico es interrumpida por un gran input ígneo en la formación Yaupi. En el Cretácico Inferior, edades del arco Alao (133.15 ± 0.85Ma;125.3 ±; 0.9Ma; 125.3 0.9Ma; 116 +0.7) han sido reportadas por Cochrane, (2013) Spikings, et al., (2015) y Romero et al., (2017). El registro detrítico de

este arco se ve reflejado en la composición de minerales pesados de la formación Yaupi. Mientras que, el Cretácico Superior es dominado por un input cratónico, presente en la formación Hollín.

CONCLUSIONES

La unidad Piuntza (Triásico) es asociada secuencias syn-rift, relacionada al rompimiento de Panguea. Asociaciones de minerales pesados (Pmp; sll ± Grt; Ol) indican el predominio de una fuente metamórfica, heterogénea. La fuente detrítica de la unidad Piuntza puede vincularse al terreno Loja en la cordillera Real, el cual incluye a metapelitas (unidad Chiguinda), granitos anatécticos (unidad Tres Lagunas) y anfibolitas (unidad Monte Olivo).

La formación Santiago (Jurásico Inferior) es interpretada como una secuencia post-rift, que incluye en la base a depósitos de plataforma somera (miembro Río Santiago), depósitos turbidíticos (miembro Yuquianza), depósitos volcánicos intracuenca (miembro Patuca) y depósitos deltaicos (miembro Puchimi). En la base de la secuencia asociaciones de minerales pesados indican la presencia de una fuente crónica mientras que, en el tope de la secuencia, se observa el predominio de una fuente ígnea, básica, la cual, incluye proporciones de Ol y Aug

La formación Chapiza (Jurásico Superior) es interpretada como una secuencia de trans-arco, asociaciones de minerales pesados (Hbl, Ttn, Ap y Zrn euhedrales) indican el predominio de una fuente ígnea, intermedia a acida. Mientras que para la Formación Yaupi, el predominio de Aug ± Hyp marcarían una afinidad básica.

La formación Hollín se caracteriza por un intenso predominio de fuente cratónica, sin embargo, la presencia de Hbl y Sll indica que existió el aporte minoritario ígneo.

REFERENCIAS

Aspden, J. A., & Litherland, M. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics,* 205, (1-3), 187-204. (1992).

Christophoul, F. Comisión zona Gualaquiza, Carretera Mendez-Patuca-Santiago-Morona y Cerro Macuma. Petroproducción. Quito. Ecuador: *Petroproducción/O.R.S.T.O.M*. (1998)

Cochrane, R. U-Pb thermochronology, geochronology and geochemistry of NW South America: rift to drift transition, active margin dynamics and implications for the volume balance of continents (*Doctoral dissertation, University of Geneva*). (2013).

Dickinson, W. R. Discriminating among volcanic temper sands in prehistoric potsherds of Pacific Oceania using heavy minerals. *Developments in Sedimentology*, 58, 985-1005. (2007).

Drobe, J., Lindsay, D., Stein, H., & Gabites, J. Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 108.11-35. (2013). doi:https://doi.org/10.2113/econgeo.108.1.11.

Gaibor, J., Hochuli, J. P., Winkler, W., & Toro, J. Hydrocarbon source potential of the Santiago Formation, Oriente Basin, SE of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*. 25(1). 145-156. (2008). doi:10.1016/j.jsames.2007.07.002

Garzanti, E., & Andò, S. Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Developments in Sedimentology*. 58. 517-545. (2007).

Gutiérrez, E. G., Horton, B. K., Vallejo, C., Jackson, L. J., & George, S. W. Provenance and geochronological insights into Late Cretaceous-Cenozoic foreland basin development in the Subandean Zone and Oriente Basin of Ecuador. *In Andean Tectonics*. 237-268. Elsevier. (2019).

Iviney-Cook, H., & Morris, N. J. Triassic bivalves from the province of Zamora Chinchipe in SE Ecuador. British Geological Survey, Gelogy and Mining. London: Technical report WH/89/28. (1989).

Jaillard, E., Caron , M., Dhondt, M., Ordoñez, M., Lascano , M., Andrade, R., y Zambrano I. Síntesis estratigráfica y sedimentológica del cretáceo y paleógeno de la Cuenca Oriente del Ecuador. (E. Jaillard , Ed.) Quito, Ecuador: *Petroproducción – ORSTOM*. (1997).

James, N.P. and Dalrymple R., W. Facies Models 4. GEotext 6. *Geological Association of Canada*. (2010).

Litherland, M., Aspden, J.A., Jemielita, R.A.,The Metamorphic Belts of Ecuador. *Overseas Memoir 11*. British Geological Survey, Nottingham, p. 147. (1994).

Mange, M. A., & Maurer, H. Heavy minerals in colour. *Springer Science & Business Media*. (2012).

Morton, A. C., Herries, R., & Fanning, M. Correlation of Triassic sandstones in the Strathmore Field, west of Shetland, using heavy mineral provenance signatures. *Developments in Sedimentology*. 58. 1037-1072. (2007).

Nie, J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Mange, M., Garzione, C. N., ... & Parra, M. Integrated provenance analysis of a convergent retroarc foreland system: U–Pb ages, heavy minerals, Nd isotopes, and sandstone compositions of the Middle Magdalena Valley basin, northern Andes, Colombia. *Earth-Science Reviews*. 110(1-4). 111-126. (2012).

Ordoñez, M., Jiménez, N., & Suárez, J. Micropaleontología ecuatoriana, datos bioestratigráficos y paleontológicos de las cuencas: Graben de Jambelí, Progreso, Manabí, Esmeraldas y Oriente; del levantamiento de la Península de Santa Elena, y de las cordilleras Chongón Colonche, costera y occidental. *Petroproducción*. Guayaquil: CIGG. (2006).

Romero C., Gaibor J., Vallejo C. y Condoy D. Stratigraphy of the Santiago Formation along the Patuca - Santiago road section; implications for the evolution of southeastern Ecuador during the Jurassic. 8th International Symposiumon Andean Geodynamics(ISAG). *IRD-developpement, IG-EPN*. Quito, Ecuador. (2019).

Romero, C., Vallejo, C., & Cerón, G. La Formación Hollín en la Cordillera del Cóndor: Estudio de la transición Fluvio-Marina, en la transgresión del Albiano. Datos Preliminares. VII Jornadas en Ciencias de la Tierra. *EPN-IG*. 117-121. (2017).

Romeuf, N. Volcanisme jurassique et metamorphisme en Equateur et au Perou. Caracteristiques petrographiques, minaralogiques et geochimiques-Implications geodynamiques. Marseille, France: (These de doctorat, Universite de Aix-Marseille III). (1994).

Ruiz, G. M. H., Seward, D., & Winkler, W. Detrital thermochronology–a new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*. 16(3). 413-430. (2004).

Ruiz, G. M., Seward, D., & Winkler, W. Evolution of the Amazon Basin in Ecuador with special reference to hinterland tectonics: data from zircon fission-track and heavy mineral analysis. *Developments in Sedimentology*. 58. 907-934. (2007).

Smale, D. Sediment trails in tectonically active islands: heavy minerals in use in New Zealand. *Developments in Sedimentology*. 58. 569-585. (2007).

Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research*. 27(1). 95-139. (2015).

Tedesco, A., Ciccioli, P., Suriano, J., & Limarino, C. O. Changes in the architecture of fluvial deposits in the Paganzo Basin (Upper Paleozoic of San Juan province): an example of sea level and climatic controls on the development of coastal fluvial environments. *Geologica acta*. 8(4). 0463-482. (2010).

Tschopp, H. J. Oil explorations in the Oriente of Ecuador, 1938–1950. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 37(1). 2303-2347. (1953).

Tucker, M. E. (Ed.). Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. *John Wiley & Sons*. (2009).

Walker, R. G. Facies modeling and sequence stratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*. 60(5). 777-786. (1990).

Winkler, W., Mid-to early Late Cretaceous flysch and melange formations in the western part of the Eastern Alps; palaeotectonic implications. *Jahrbuch der Geologischen Bundesantalt Wien*. 131 (2). 341-389. (1988).

Yaneva, M. Associations of heavy minerals in neogene Sandanski and Strumeshnitsa grabens, South-West Bulgaria. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 57(4). 4-49. (2004).

TÉCNICAS DE APOYO EN LA CARACTERIZACIÓN DE MINERALES GRANULARES (ÁRIDOS) DE AMPLIO USO EN LA INDUSTRIA

Romero M.[a], Negrelli M.[a], Neyra G.[a], Cano E.[a]

[a] [a]*Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, ARGENTINA*

Universidad Nacional de San Juan. ARGENTINA

e-mail: mailto:mromero@unsj.edu.ar

RESUMEN

Los minerales granulares (áridos) constituyen las materias primas para diversas industrias y están estrechamente relacionadas con el desarrollo económico de la región. Es conocido su requerimiento para las obras mineras y viales que se encuentran en constante desarrollo dentro de la provincia. Debido a ello, sus propiedades físicas, mecánicas y químicas son parámetros de estudio de gran importancia, ya que permiten establecer sus posibles usos y aplicaciones, de acuerdo con la normativa vigente. Dadas las exigencias, en cuanto a la calidad que reclaman las industrias, para estos materiales, se hace necesario contar con otras técnicas de apoyo como la realización de un análisis mineralógico – petrográfico para entender el comportamiento y propiedades de estos minerales, y a su vez complementarlo con los ensayos tradicionales (ensayos normalizados físico-mecánicos) establecidos siguiendo una serie de procedimientos efectivos. En este trabajo, se pretende mostrar una metodología integradora que proporcione compilar las diferentes técnicas de estudio para la caracterización global de las muestras de minerales granulares. Para tal propósito, se plantea el análisis de una cantera piloto ubicada en un área estratégica para la economía regional, debido a su conectividad con la zona del Valle de Tulum, en la provincia de San Juan. Actualmente, las obras de infraestructura sobrepasan la oferta de áridos existente, por lo que se requiere inversión en prospección y exploración de nuevas canteras y actualización de las ya existentes. Por lo antes expuesto, la metodología de abordaje propuesta, conjunto con la realización de diversos ensayos se sugiere como novedosa para la gestión inteligente de la explotación del recurso minero.

Palabras Clave: Minerales Granulares, Caracterización, Ensayos físico mecánicos.

INTRODUCCIÓN

Los minerales granulares presentes en el lecho de ríos y sedimentos de pie de monte, se presentan de diversos tipos tanto por su génesis cómo por sus características físico – mecánicas. Constituyen una materia prima valiosa para las obras mineras y civiles. En el caso de la provincia de San Juan, los yacimientos se ubican en una extensa área del Valle de Tulum, históricamente se explotaban áridos en las playas y márgenes del río San Juan por su cercanía y buena calidad, sin embargo, su actual demanda ha impuesto la necesidad de incorporar nuevas áreas de explotación sostenible de este recurso. Por tal motivo, se hace necesario la implementación de nuevas técnicas que permitan realizar una caracterización completa de sus propiedades en función de los requerimientos solicitados por los diferentes usos.

A continuación, se muestra en la "Fig 1." una de las canteras seleccionadas como área piloto para la aplicación de esta metodología de caracterización.

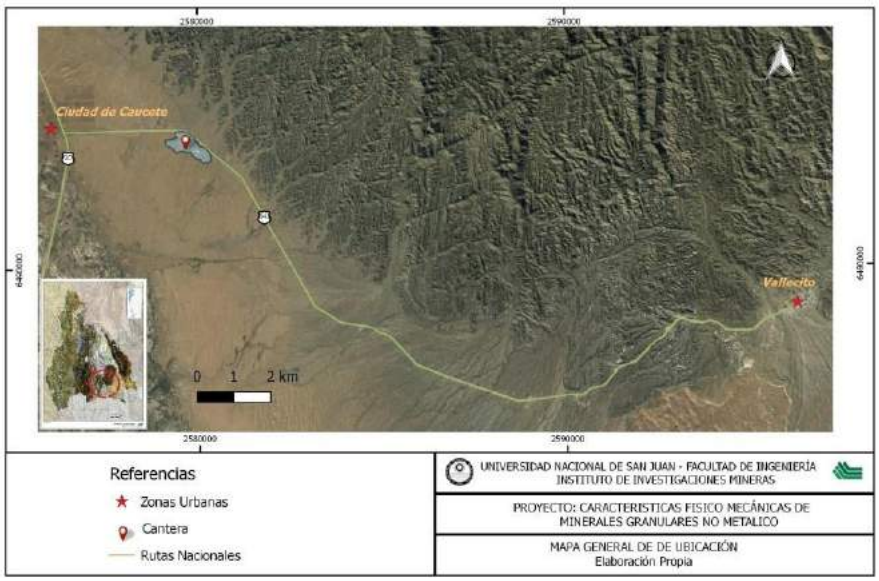


Figura 1. Ubicación de la zona piloto a partir de la cual se iniciaron los estudios.
Se eligió el pie de monte de la Sierra de Pie de Palo, como proveedora de una muy interesante cantidad y variedad de minerales granulares.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

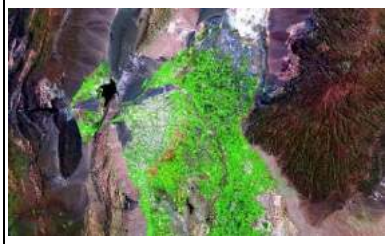
Ensayos de Caracterización

Procesamiento Digital de Imágenes

Una primera de etapa de trabajo para la caracterización de los materiales consistió en el análisis multiespectral, lo que permitió situar espacialmente las zonas de las canteras, para posteriormente clasificar estos minerales de interés. Para ello se realizaron viajes de campo con el objetivo de extraer muestras que luego fueron sometidas a los diversos ensayos que exigen las normativas vigentes.
Para cumplir los objetivos del trabajo se realizó previo a las salidas de muestreo en campo, un análisis multiespectral de imágenes satelitales. Para adquirir un amplio conocimiento de las zonas de estudio, ya que durante una primera etapa de recopilación de antecedentes se pudo reunir considerable información acerca de estas.
El procesamiento de imágenes satelitales nos permite analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión. A partir de las distintas bandas multiespectrales de los satélites podemos interpretar aspectos como vegetación, usos del suelo o presencia de minerales de interés. Para ello, se realizó el procesamiento digital de una imagen Landsat 8, en la cual se ejecutaron combinaciones específicas RGB, las que nos mostraron y discriminaron elementos del terreno de manera particular. Mediante el procesamiento de imágenes satelitales proporcionó la visualización de áreas con diferentes litologías y principalmente la identificación de zonas de aportes y zonas favorables para la extracción de áridos, como así también aquellas con mayor cobertura vegetal.

Con la información extraída del procesamiento digital de imágenes, junto con los relevamientos topográficos, sumado la recopilación de antecedentes del área, se elaboró una tabla con los resultados obtenidos los cuales pueden verse reflejados en la Tabla I.

Tabla I. Imágenes LANDSAT 8 de alta resoluciones utilizadas

Imágenes de Alta resolución LANDSAT 8 – Fuente USGS		
		
Comparativa de bandas RGB 432	Comparativa de bandas RGB 543	Comparativa de bandas RGB 654
Las combinaciones RGB dieron como resultado una buena diferenciación entre la roca de aporte de sedimentos y las áreas de piedemonte.	Los contrastes obtenidos son de gran utilidad para definir litologías y áreas de aporte en diferentes zonas de piedemonte donde actualmente se están poniendo en re-funcionamiento antiguas canteras de áridos.	En la imagen se puede ver un fuerte contraste de la vegetación. Nos sirve para identificar como las canteras se encuentran principalmente en las periferias, en las zonas de abanicos, donde se observa suelo desnudo.

Caracterización de laboratorio

En una segunda etapa de trabajo se realizaron viajes de campo, con el doble objetivo del relevamiento de las áreas de potencial interés y la extracción de muestras. Las cuales fueron sometidas a ensayos normalizados para comprobar la aptitud y calidad del material.

Las muestras deben pasar por una sucesión de pasos previo a ser ensayadas. Primeramente fueron homogeneizadas para ser reducidas en cantidad y así obtener una muestra representativa del área. Esto se realizó teniendo en cuenta la norma IRAM 1509 de muestreo de los agregados.

Posteriormente se secaron en estufa durante 24 horas, a una temperatura de 105º aproximadamente, hasta peso constante, de la cual se obtuvieron una cantidad de masa mínima acorde al tamaño máximo nominal, según la normativa que establece cada ensayo.

En la siguiente Tabla II, se muestran una serie de ensayos de gran relevancia para los minerales granulares. Esta serie de ensayos posibilitan conocer sus características físico mecánicas y establecer así sus potenciales aplicaciones industriales.

Tabla II. Ensayos normalizados que se realizan a cada uno de los materiales

Desgaste Determina la resistencia de los materiales a la abrasión	**Lajosidad** Establece un índice de la forma de los componentes de la muestra	**Elongación** Fija un índice de elongación de la muestra	**Cubicidad** Se obtiene un % que relaciona la forma cúbica de la muestra
			
Índice de Azul de Metileno Método empleado para obtener la valoración de elementos arcillosos en los materiales finos	**Plasticidad** Se determina el límite líquido y el límite plástico para obtener el índice de Plasticidad	**Contenido de Materia Orgánica** En algunos casos, el contenido de materia orgánica debe ser nulo	**Porosidad y Densidad** Se utiliza para conocer el porcentaje de espacios vacíos y su influencia en la densidad de la roca
			

Caracterización Mineralógica

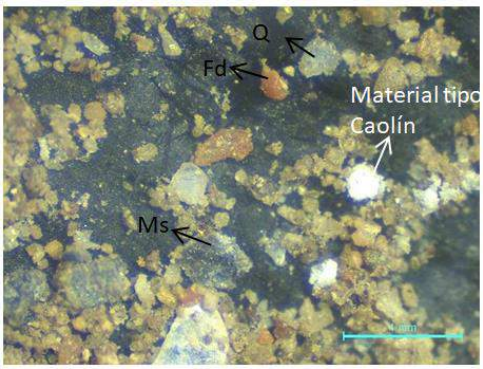
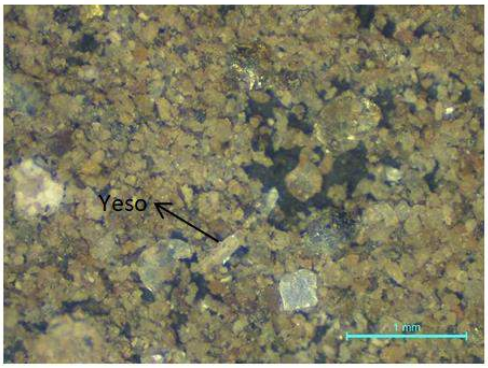
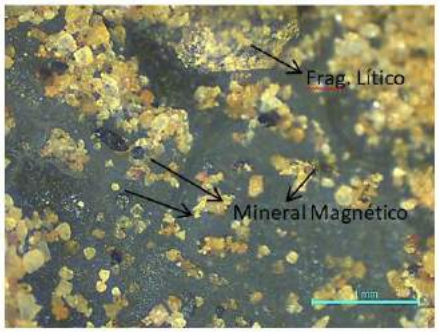
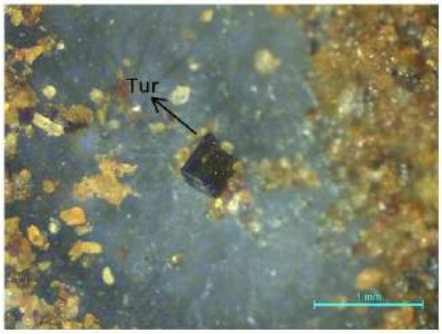
Para el reconocimiento mineralógico, se utilizó Lupa binocular Leica S6D Stereo Microscope (10x-64 X), provisto de una cámara de video Leica DFC 295 incorporada y monitor de alta resolución. Y Microscopio Óptico de Polarización Leica DM 2700 P con luz trasmitida, provisto de una cámara de video Leica DFC295 incorporada, ambos poseen software para tratamiento de imágenes. Para las observaciones por transparencia, se empleó la técnica de grano suelto con líquido de inmersión η= 1,54.

Macroscópicamente la muestra se compone por material clástico de diversas granulometrías, predominando la fracción fina de tamaño arena – limo, por sobre la fracción gruesa (tamaño grava). Mediante este análisis, se determinó que las especies presentes en las fracciones finas son: Cuarzo hialino y lechoso, que se manifestaron de formas angulosas a sub-redondeadas. Se observó la presencia de fragmentos líticos, de diferentes tamaños que corresponden a rocas metamórficas tipo filitas. También se identificaron minerales micáceos; feldespatos con signos de alteración y escasas turmalinas.

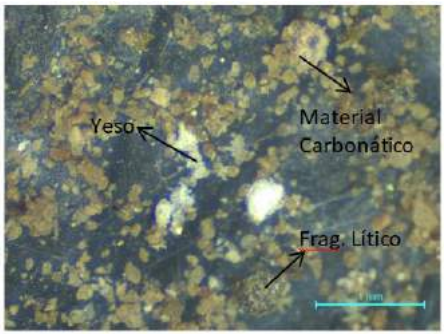
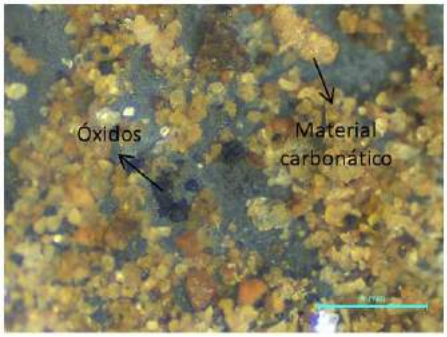
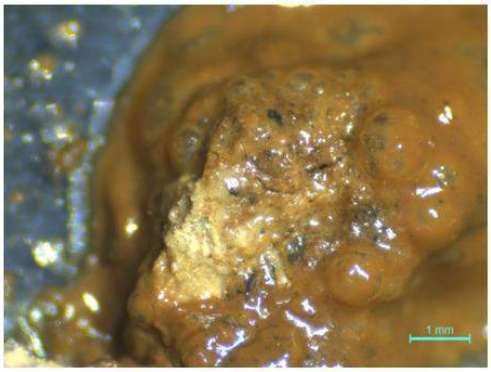
Pudo identificarse tres tipos de materiales a manera de pátinas recubriendo la superficie de los clastos y en forma de concreciones irregulares sueltas. Material blanco de aspecto sacaroide (arcilla tipo caolín); material carbonático y material ferruginoso (óxidos).

Con respecto al estudio sobre los fragmentos de granulometría mayores a los 2mm (tamaño grava), estos corresponden a rocas metamórficas de tipo filitas, las cuales en su mayoría presentan patinas de material carbonático. Estas características descriptas se detallan en la siguiente tabla III.

Tabla III. Descripción Mineralógica

<table>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Material clástico de diferentes granulometrias</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Especies minerales: cuarzo (Q), feldespatos (Fd), muscovita (Ms) y concreciones de probable material arcilloso</td><td>Mineral de yeso fibroso</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>Minerales magnéticos y fragmentos líticos</td><td>Cristal de turmalina (Tur)</td></tr>
</table>

 ISBN 978-987-1323-66-1

	
Fragmentos líticos, concreciones de material carbonático, nódulos de yeso	Concreciones de óxidos y de material carbonático
	
Fragmentos de material carbonático	Efervescencia del material carbonático con óxidos
	
Gravas de filita con patinas de material carbonático y óxidos	Gravas de filita

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación con la Normativa Vigente

Una vez realizados todos los ensayos correspondientes, se procedió a la comparativa de cada material con la aptitud que presenta para cada aplicación en la industria. Con todos los resultados obtenidos en cada una de las etapas de caracterización (procesamiento digital de imágenes, ensayos físico-mecánicos y ensayos mineralógicos) se elaboraron una serie de tablas con la información de cada cantera relevada. A continuación, y a modo de ejemplo, en la Tabla IV se exponen los resultados de una cantera de material metamórfico de muy buena calidad para diversas aplicaciones.

Tabla IV. Tabla base, con la cual se caracterizan los minerales granulares provenientes de cada cantera

Cantera	Ensayo Realizado	Norma	Resultados	Calidad	Usos
	Desgaste	IRAM 1532	Apto	Bueno	Viales
	Lajosidad	IRAM 1687-1	Apto	Bueno	
	Elongación	IRAM 1687-2	Apto	Bueno	
	Densidad	IRAM 1533	Apto	Bueno	
	Porosidad	UNE 83134 NLT 153	Apto	Bueno	
	Plasticidad	IRAM 15102	Apto	Bueno	
	Índice de azul de metileno	NLT – 171/90	Apto	Bueno	
	Factor de cubicidad	VN-E16-67	Apto	Bueno	Capa de rodamiento
	Granulometría	IRAM 1505	Apto	Bueno	
	Petrografía Material Grueso	IRAM 1702 1703	Apto	Bueno	Bases Sub bases
	Caras Fracturadas	IRAM 1851	Apto	Bueno	
	Polvo Adherido	IRAM 1883	Apto	Bueno	
	Equivalente de Arena	IRAM 1682	Apto	Bueno	Hormigones
	Contenido de Materia Orgánica	NLT – 118/91	Apto	Bueno	
	Durabilidad	IRAM 1525	Apto	Bueno	
	Contenidos de Carbonatos/pátinas	IRAM 1649	Apto	Bueno	

Diseño y confección de una Base de Datos Geominera

Finalmente, y con la información obtenida en las tablas previamente mencionadas, se elaboró una base de datos con el propósito de sistematizar cada área de estudio.
Esta base integró los datos de campo y laboratorio para obtener una síntesis de los atributos de cada cantera abordada. Dichas tablas pudieron ser cargadas en un SIG libre como es el soft QGIS, sin embargo, estos layers también pueden ser utilizadas en otros softwares de planificación y diseño minero. En la figura N°2 se muestra el ejemplo de cómo se diseñó la tabla de la base de datos y como se aplica a un área piloto (área de estudio seleccionada).

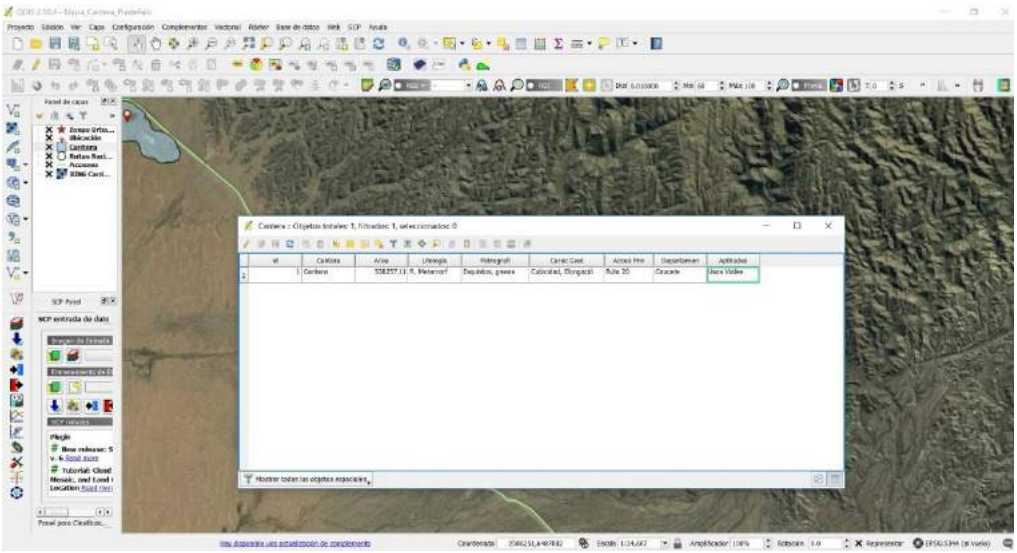


Figura 2. Tabla de Atributos del SIG, donde se cargan los datos obtenidos de los ensayos realizados

CONCLUSIONES

Se realizaron tres tipos de caracterizaciones en los minerales granulares: procesamiento digital de imágenes satelitales, ensayos de caracterización física-mecánica y ensayos mineralógicos, para ser integrados como una herramienta de apoyo para la aplicación de los materiales según los diferentes usos. Esta metodología permitió conocer e identificar qué tipo de especificaciones técnicas generales deben cumplir los minerales granulares, para que el uso sea el adecuado según su requerimiento.

Esta metodología integradora resultó de suma importancia para aquellas industrias relacionadas a los áridos, por constituir un recurso de gran demanda en la actualidad. Es por ello, que la implementación de este tipo de metodología posibilita caracterizar las propiedades de los minerales granulares para que se cumplan las estrictas normas de calidad que se especifican en sus aplicaciones (hormigones, usos viales, minería, entre otros) ya que, resulta fundamental para disponer de ellos como recurso natural básico para el desarrollo de la economía regional.

REFERENCIAS

AYAKWAH, V. T. MCLEMOREA. FAKHIMI, A. K. DICKENS G. F., 2009. Effects Of Weathering And Alteration On Point Load And Slake Durability Indices Of Questa Minematerials, New Mexico. SME Annual Meeting Feb. 22-Feb. 25, 2009, Denver, CO Copyright © 2009 by SME.

BARTON N., CHOUBEY V., 1977. The shear strenght of rock joints in theory and practice.Rock Mechanics 12, p 1-54.International Society for Rock Mechanics. 1981.

Dana E. (1973).TRATADO DE MINERALOGIA 4ta. Edición Compañía Editorial Cotinental S.A. Mexico-España, Argentina-Chile .Pags.436 - 725

DEERE, D.U. and DEERE, D.W., The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Rock Clasification Systems for Engineering purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 91-101.

DEMPERS, G.D., 1994. Optimal Usage of Exploration Core for Geotechnical Purposes. IV CSMR / Integral Approach to Applied Rock Mechanics, Santiago, Chile, p 219-330.

FARMER, I. W., 1968. Engineering Properties of Rocks (Capítulo 3). E & F.N.SPON.td. Londres –

FISHER, R. V. &SCHMINCKE H.-U., (1984) Pyroclastic Rocks, Berlin, Springer-Verlag

Giggenbach, W.F. (1997). The Origin and Evolution of Fluids in Magmatic-Hydrothermal

HEDENQUIST JEFFREY W. Hedenquist y Jeremy P. Richards 1998 Systems. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, TerceraEdición, Hubert L. Barnes (ed.), John Wiley and Sons Inc. Publication, 737-796. The influence of Geochemical Techniques on the Development of Genetic Models for Porphyry Copper Deposits, publicado en el Vol. 10 de Reviews in Economic Geology de la Society of Economic Geologists.

HOEK, E., MARINOS, P., y BENISSI, M. 1998. Applicability of the Geological Strength.

ISRM 1981. ISRM suggested methods: Rock Characterization. In: Brown ET, editor. Testing and monitoring. London: Pergamon;

LE MAITRE, R. W. (editor), A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas, B. Bonin, P. Bateman, G. Bellieni, A. Dudek, S. Efremova, J. Keller, J. Lamere, P. A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, and A. R. Woolley,2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks.Cambridge University Press. ISBN 0-521-66215-X

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ; J. 2008 Tesis: INFLUENCIA DE LA ALTERACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CALIZAS, DOLOMÍAS Y MÁRMOLES. EVALUACIÓN MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS". Universidad de Alicante, España.

EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS SOBRE LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES ASOCIADAS A *Calotropis procera*

Rosas J.[a], López-Hernández I.D.[a] y Toro M. [a]

[a] *Laboratorio de Ecología de Agroecosistemas, Instituto de Zoología y Ecología Tropical (IZET), Universidad Central de Venezuela, Caracas, VENEZUELA*

e-mail: jesmaryrosasb@gmail.com

RESUMEN

La explotación de rocas para la elaboración del cemento emite material particulado y metales pesados contaminando el ambiente, propiciando la pérdida de la biodiversidad y afectando la biota del suelo. Calotropis procera (Familia Apocynaceae), es una planta invasora, adaptada a climas áridos y semiáridos de suelos arenosos, calcáreos y salinos, con amplia distribución en el continente americano y el Caribe. Para estudiar la presencia de la simbiosis micorrizica arbuscular en un suelo contaminado, se realizó un muestreo sistemático de vegetación en una zona impactada por cementeras, encontrándose que C. procera era la especie dominante con frecuencia de aparición de 71 %. Se tomaron muestras del suelo rizosférico de C. procera en las zonas contaminada (ZC) y no contaminada (ZNC) y se compararon las características del suelo, contenido de metales pesados, proteínas del suelo asociadas a la glomalina (PSAG), longitud de raíz micorrizada (% LRM), micelio y morfotipos de esporas de hongos Glomeromycota. Los resultados mostraron incremento significativo en ZC de los contenidos de Cd y Pb Totales (2,39 y 29,5 ppm), Zn y Cu (8,8 y 13,6 ppm) disponibles. El % LRM fue 67,02%, la longitud de micelio 7,41 m/g de suelo y PSAG: 0,31 mg/ g de suelo, siendo algunos menores respecto a ZNC. En ZNC, Cd y Pb Totales (1,61 y 21,46 ppm), Zn y Cu disponibles (1,06 y 8,8 ppm) fueron menores a ZC; los parámetros micorrizicos, % LRM: 75,44%, longitud del micelio: 13,44 m/ g de suelo y PSAG: 0,13 mg/g, fueron significativamente mayores respecto a ZC excepto la PSAG. Se identificaron 5 morfotipos de hongos Glomeromycota para ZC (Familias: Glomeraceae, Gigasporaceae y Acaulosporaceae) y cuatro para ZNC (Familias: Glomeraceae, Gigasporaceae). Nuestros resultados muestran que la actividad industrial afectó las micorrizas arbusculares asociadas a C. procera e incrementó el contenido de metales pesados en el suelo

Palabras Clave: C. procera, cementera, micorrizas arbusculares, metales pesados, proteínas del suelo asociadas a la glomalina (PSAG)

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los problemas ambientales afectan la calidad de vida de los seres vivos. La contaminación de los principales recursos aire, suelo y agua, trae como consecuencia la disminución de los beneficios y servicios que brindan los diversos ecosistemas. La industria cementera se ha convertido en uno de los principales responsables de la acumulación de residuos entre los cuales se pueden mencionar el lodo y polvo (Zhu W and Gibbs J.C., 2005). Los residuos generados por la producción de cementos producen impactos ambientales, los cuales se ven reflejados a nivel socioeconómico en las áreas donde se encuentra establecida la actividad industrial (Cerdera, 2009). La producción de cemento para la construcción es una fuente emisión de metales pesados tal como el Cd,

Pb, Al, Cu, Zn, Fe, Ni entre otros, los cuales son los principales elementos metálicos presentes en los residuos generados por las emisiones de los hornos, los cuales en combinación con otras moléculas pueden ser volátiles y semivolátiles, contaminando el aire en forma de material particulado, el agua y el suelo (ISTAS, 2002). Hoy en día una manera de evaluar el impacto que genera este tipo de actividades en los ecosistemas, es tomando en cuenta las especies de plantas tolerantes presentes en estas condiciones de estrés por la presencia de contaminantes, es este caso por metales pesados en el suelo. *Calotropis procera* (Aiton) W.T pertenece a la familia de las Apocynaceae, es una especie que se adapta a ambientes degradados (Rivas, 2016). Es originaria del Asia y de África, ampliamente distribuida en América del Sur, América Central y el Caribe (Boutraa, 2010), es una planta de hábito perenne, y se adapta en zonas áridas y semiáridas, donde los suelos son arenosos y existe baja pluviosidad (Barbosa et al, 2014). La tolerancia de las plantas a diversas concentraciones de metales pesados en ambientes degradados viene mediada por asociaciones con microorganismos presentes en el suelo como lo son los hongos micorricícos arbusculares (HMA). Estas asociaciones benéficas permiten a las plantas tolerar estreses hídricos y nutricionales, la presencia de fitopatógenos y /o sustancias tóxicas en ambientes contaminados (Toro M and Andrade G., 2020). Sin embargo las concentraciones de metales pesados pueden afectar los propágulos micorrízicos en la rizósfera de la planta. Varios autores han descrito que las proteínas del suelo asociadas a la Glomalina, producida por los hongos Glomeromycota o HMA, ejercen un papel de protección de la planta ante los metales pesados y otros contaminantes, estabilizando a dichos contaminantes en la rizosfera lo que aminora su efecto adverso sobre la planta (Ferrol et al, 2016). El presente trabajo de investigación tiene por objetivo mostrar el efecto de las concentraciones de algunos metales pesados presentes en la rizósfera de *C. procera* procedente de una zona contaminada con residuos de una red de cementera establecida en la zona baja del río Tanaguarena del Estado La Guaira- Venezuela, y observar la respuesta de los diversos indicadores de las micorrizas arbusculares asociadas a *C. procera.*

MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio:

El sistema de pequeñas industrias de producción de cementos y bloques de Tanaguarena se encuentra ubicado en la Parroquia de Caraballeda, Municipio Vargas, Estado La Guaira (10 ° 36´31,85´´ N 66 ° 49´36,61´´ W). Esta red de pequeñas productoras de cementos tipo Portland y Clinker esta distribuidas en la zona baja del río Tanaguarena de la región Centro-Costero del Litoral, siendo parte de la Cordillera de la Costa en Venezuela.

Muestreo de suelo y la vegetación

Vegetación: Se realizó un muestreo sistemático en forma de zig-zag tomándose ocho puntos muestrales en la zona donde se encuentran las cementeras y tres muestras en la zona no impactada por la actividad siguiendo la dirección del transecto. El área fue delimitada en dos zonas: contaminada y no contaminada (ZC y ZNC). La descripción realizada de la vegetación en la visita previa corresponde al matorral seco, típico de la región costera, sin embargo existen especies invasoras entre ellas se observó a *C. procera*, escogida para este estudio por estar presente con más del 50% de frecuencia de aparición en cada zona.

Suelo: Las muestras de suelo rizósferico se extrajeron con barrenos elaborados con tubos PVC, de bordes dentados con el fin de perforar el suelo, ya que se encontraban endurecidos en la superficie producto de la deposición de cemento que forman costras. La profundidad de la toma de muestra fue de 0 a 20 cm de profundidad. Se extrajeron alrededor de 4 núcleos alrededor de la planta y se mezclaron para obtener una muestra compuesta por cada planta. Las muestras fueron preservadas a 4°C hasta ser procesadas.

Determinación del contenido de metales pesados en los suelos rizosféricos de *C. procera*: Se realizaron muestras compuestas del suelo de ZC y de ZNC, analizándose cada muestra compuesta por triplicado. Las concentraciones de los iones metálicos: Cd, Pb, Zn, Cu se determinaron mediante el método de Hunter et al (1987).

Determinaciones biológicas asociadas a los Hongos Micorrizicos Arbusculares (HMA) en la rizósfera de *C. procera*

Identificación de morfotipos de HMA: Para la obtención de las esporas de HMA en las muestras de suelo se aplicó la metodología de tamizado húmedo y decantación según (Sieverding, 1991). Una vez obtenidas las esporas se procedió a separarlas en base a sus caracteres morfológicos como la coloración, tamaño, posición de la hifa y presencia de otras estructuras. Estos criterios morfológicos para identificar las esporas fueron propuestos por (Morton J and Betivenga S.P., 1994).

Una vez separados los distintos morfotipos se procedió a la identificación hasta familia con las referencias disponibles en la Colección de Internacional de Cultivos de HMA (INVAM) (http://invam.wvu.edu/).

Determinación del porcentaje de Longitud de Raíz Micorrizada (%LRM): las raíces secundarias de la planta fueron extraídas de las muestras de suelo, luego se sometieron a una decoloración con KOH al 10% por 24h. Obtenidas las raíces decoloradas se procedió a realizar la tinción con azul de tripano con la finalidad de observar las estructuras internas formadas por los HMA en el interior de la raíz (Phillips J.M and Hayman D.S., 1970). Realizada la tinción se preservan en una solución lactoglicerina. Para la cuantificación del % LRM, se utilizó una capsula de Petri cuadriculada y una lupa marca Leica modelo MZ6. Realizado el contaje se procede a calcular la colonización micorrizica (Giovanetti M and Mosse B., 1980), con el uso de la siguiente ecuación.

$$\%\,\boldsymbol{LRM} = \left(\frac{Raices\ micorrizadas}{Raices\ totales}\right) \times 100$$

Longitud del micelio: El método se basa en extraer del suelo de la rizósfera la mayor cantidad posible de micelio, mediante el uso de una solución dispersante como el calgón al 37% (Hexametafosfato de sodio), el cual permite que la hifas sean resuspendidas de los microagregados del suelo, luego se realiza un filtrado al vacío empleando filtro de 0,2 μm de nylon (Boddington et al,1999). La tinción se realizó con el procedimiento aplicado para observar las estructuras internas asociadas a los HMA en las raíces. La cuantificación se llevó a cabo realizando fotografías en la membrana que contenía las hifas con una cámara LEIKA modelo MC190HD, acoplada al microscopio al aumento de 40X. Una vez obtenidas las fotografías se empleó el programa Image Pro plus, para

cuantificar la longitud del micelio de los hongos Glomeromycota. Las medidas son expresadas en m micelio/ g de suelo.

Determinación de las Proteínas del Suelo Asociadas a la Glomalina Total (PSAG-T): El método de extracción de las proteínas asociadas a la Glomalina fue propuesto por (Wright S.F and Upadhyaya A., 1998), el cual consiste en mezclar 2g de suelo con 8ml de una solución extractante de Citrato de Sodio 50mM, luego esta se introdujo en la autoclave por 90 min a una temperatura de 120°C. Terminado el procedimiento de extracción se observó una solución de color pardo-rojiza, la cual se almacenó a 4°C. Este proceso se repitió hasta obtener una solución transparente.

Determinación de las Proteínas del Suelo Asociadas a la Glomalina Fácilmente Extraíble (PSAG- FE): La extracción se realizó con una solución extractante de Citrato de Sodio a una concentración de 8 mM, luego se realizaron los pasos del método anterior hasta obtener un extracto transparente.

Cuantificación de las Proteínas del Suelo Asociadas a la Glomalina (PSAG): Una vez obtenidos los extractos de PSAG.FE y PSAG-T se determinó la cantidad de proteína que contenían por el método de (Bradford, 1976).

Análisis Estadísticos: Se realizaron pruebas de comparación de medias (t-p<0,05) para observar las diferencias en las concentraciones de los metales pesados y un ANOVA de una vía con una prueba no paramétrica Kruskal- Wallis con p<0,05 para muestras independientes y observar la existencia de diferencias significativas de los parámetros medidos entre ZC y ZNC. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico PAST 326b.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El muestreo realizado en el área de estudio permitió observar la frecuencia de aparición de las especies de plantas presentes en la zona baja de la Cuenca del río Tanaguarena donde se ubica la red de procesadoras de cementos. Esta área se caracteriza por la presencia de matorrales secos típico de la región costera. Por la incidencia de la actividad industrial el sistema natural ha sido perturbado observándose pérdida de especies autóctonas, lo cual ha propiciado el establecimiento de especies invasoras como *C. procera*. En la siguiente tabla se observa la frecuencia de aparición de especies en los puntos muestrales a lo largo del transecto.

En la tabla 1 se observa que *C. procera* es la especie que presenta una mayor frecuencia de aparición mostrando el valor del 71,2% del total de las especies en ZC, y en ZNC se observa un 62,5%. En base a estos resultados se escogió a *C. procera* como planta indicadora del ambiente a estudiar. (Mack, 2000) menciona que existen especies que proliferan en ambientes perturbados aumentando su distribución y persistencia, tal es el caso de esta especie, ya que se adapta a ambientes semiáridos donde los suelos son arenosos y con tendencia a la alcalinidad, similar a nuestro caso (CAB internacional, 2005). Una vez obtenidas las frecuencias de aparición y elegida la planta indicadora, se procedió a la toma de las muestras de suelos en los puntos del transecto. En la tabla 2, se muestran las concentraciones de los iones Cu, Zn, Pb y Cd tanto para ZC y ZNC.

Tabla I. Frecuencia de aparición de las especies vegetales en la ZC y ZNC

Especies	Frecuencia en ZC	Frecuencia en ZNC
Gramíneas	12,12%	12,5%
Lianas y Bejucos	3,03%	0%
Prosopis sp (cuji)	7,57%	6,25%
*Calotropis procera (*algodón de seda)	**71,21**%	**62, 5%**
Mangifera indica (Mango)	4,54%	18,75%

El total de puntos de muestreo para ZC y ZNC.

Tabla II. Concentraciones de MP (Cu, Zn, Pb y Cd) en muestras de suelo rizosférico

Muestras	Cu disponible	Zn disponible	Pb Total	Cd Total
		mg / kg		
ZC	13,6± 7,92 a	8,8± 0,00a	29,5± 2,86a	2,39± 0,55a
ZNC	8,6± 1,13b	1,04± 0,28b	21,46± 0,03b	1,61± 0,05b

**Pruebas Estadísticas con (t- p<0,05). Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas

Los resultados obtenidos muestran las concentraciones de Pb, Cd (totales) y los iones disponibles Cu y Zn, siendo en ZC los valores más elevados con respecto a ZNC (tabla 2). Las concentraciones de los iones totales fueron comparados con los obtenidos por (Ramírez, 2008), quienes trabajaron en la misma zona en 2008, y reportan valores de estos iones metálicos totales para Pb (1,5 mg/kg) y Cd (1,8 mg/kg) observándose un incremento en las concentraciones de Pb y Cd para la fecha de este estudio. Estos resultados nos hacen considerar a la concentración de Cd como de alto riesgo, ya que supera los límites permisibles mencionados por (UESPA, 2015) según los cuales las concentraciones de Cd en el suelo no deben superar 0,48 mg/kg. Por lo tanto estos suelos poseen un alto contenido de este ión, siendo la industria cementera una fuente de incremento de este MP. Con respecto a los otros iones, las concentraciones detectadas no representan riesgo de toxicidad.

En la siguiente tabla se resume los valores obtenidos para cada uno de los indicadores biológicos relacionados con las micorrizas arbusculares en la rizósfera de *C. procera.*

Tabla III. Indicadores biológicos asociados a los HMA en las muestras de suelo rizosférico de *C. procera*

Muestras	N° de Esporas / 100g de suelo	Longitud de micelio (m/ g de suelo)	% LRM	PSAG-T (mg de proteína/g de suelo)	PSAG-FE (mg de proteína/g de suelo)
ZC	124 ±26,61a	7,41± 8,18 a	67,02 ±14,70a	0,44 ± 0,04[a]	0,31± 0,1a
ZNC	111±8,61 a	13,14 ± 3,56 b	75,4 ± 6,77b	0,44± 0,04[a]	0,13 ± 0,04 b

Número de muestras: 11muestras en total (8 ZC y 3 ZNC) analizadas por triplicado. Se muestran valores promedios. (±) Desviación Estándar

** Test de Kruskal –Wallis p<0,05). Valores seguidos con la misma letra en la misma columna no muestran diferencias significativas

 ISBN 978-987-1323-66-1

El primer indicador es el número de esporas de HMA contabilizado en cada zona, el valor observado en ZC es ligeramente mayor con respecto a ZNC aunque no muestra diferencias estadísticamente significativas. Este valor puede estar condicionado a las condiciones edafoclimáticas que pueden estar afectando el incremento de las esporas. Con los morfotipos aislados se procedió a la identificación hasta familia de las esporas de HMA, encontrándose para (ZC), 5 morfotipos que se distribuyen de la siguiente manera: 78% morfotipo 1, 8 % para los morfotipos 2 y 4, 4% para el morfotipo 3, 2% para el morfotipo 5. Por las características observadas, los morfotipos 1, 2,3 están asociados al Orden de los Glomerales, donde se incluyen a la familia *Glomeraceae* y se encuentran los géneros *Glomus* y *Rizophagus, Funneliforme*, *Septoglomus* (Salmerón-Santiago et al, 2015) (Fig.1a). Los morfotipos 4 y 5 comparten características morfológicas que definen al Orden de los Diversiporales, el cual incluye a las familia de las *Gigasporaceae* y al género *Gigaspora* sp (morfotipo 4) y a la familia *Acaulosporaceae* con el género *Acaulospora* sp (morfotipo 5) (Salmerón- Santiago et al, 2015; Shuβlër et al, 2004; Krüger et al, 2012; INVAM, 2020). En (ZNC) se observaron 4 morfotipos de los cinco identificados. Estos se distribuyen en la composición de la siguiente forma: 88% morfotipo 1; 7% morfotipo 2; 3% morfotipo 4 y 2% morfotipo3. Al igual que en ZC, los tres primeros morfotipos corresponden a la familia de las *Glomeraceae*, y por último el morfotipo 4 corresponde a la familia de las *Gigasporaceae* que incluye a los géneros *Gigaspora*, *Racocetra*, *Dentiscutata y Cetraspora*. Comparando ambas composiciones se observa diferenciación entre las comunidades, ya que en ZC se observa la presencia de mofotipos relacionados con las familia *Glomeraceae, Gigasporacea* y *Acaulosporaceae*, mientras que solo en ZNC solo se encuentran dos familias (*Glomeraceae* y *Gigasporaceae*), siendo los morfotipos asociados a la familias *Glomeraceae* y *Gigasporaceae* comunes para ambas zonas.

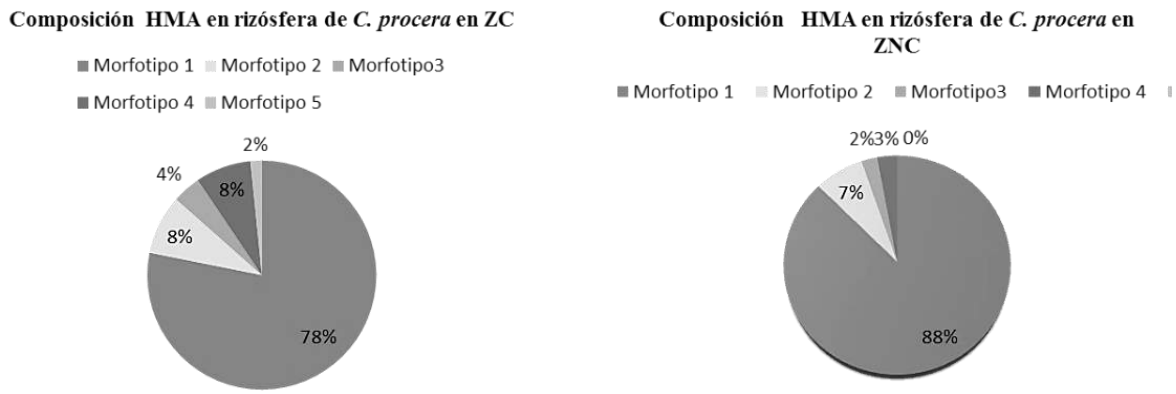


Figura. **1** Composición de la comunidad de HMA presentes en las rizósfera de *C.procera* en ZC y ZNC de Tanaguarena (a y b).

En cuanto a la longitud del micelio se observan diferencias significativas en ambas zonas, siendo ZNC la de mayor valor, esto indica que en ZC el nivel de toxicidad de los iones de MP afectó a este parámetro, en este caso el Cd el cual supera los límites permisibles en suelo según la UESPA (2015). Curaqueo et al (2014) y Armenta et al (2016) mencionan que la producción de hifas está condicionada por la fisiología de la planta, las características del clima y del suelo, sobretodo este último en ZC, donde el suelo presenta costras grises de restos de residuos de cemento que alteran la estructura física y con ello la afectación de los propágulos de HMA, en este caso, las hifas.

Respecto a la colonización micorrizica de *C. procera* en ZNC se observó el mayor porcentaje de LRM, alcanzando un valor de 75,4% en comparación a ZC el cual fue de 67%, lo que indica que la cantidad de MP detectados también afectó a este parámetro. Estos valores de colonización micorrízica indican que existe una alta afinidad de la planta por la simbiosis, además de mostrar la eficiencia de infectividad de los morfotipos presentes en el suelo. Estos valores muestran semejanza con el reportado por (Prsanthi et al, 2016) el cual fue 76% de LRM en *C. procera* presente en un ecosistema urbano. Ambos resultados reportados sustentan la afinidad de *C. procera* por los HMA, sobre todo cuando está presente en ambientes impactados, lo cual puede estar indicando que la asociación micorrízica de esta planta favorece su tolerancia y persistencia en estos ambientes, por lo tanto la hace exitosa en comparación a otras especies de plantas. En relación a las proteínas del suelo asociadas a la Glomalina (PSAG), se encontraron diferencias significativas de PSAG-FE, observándose un incremento en el valor registrado en ZC con respecto a ZNC. La mayor cantidad de PSAG-FE producida por *C.procera* en ZC sugiere que la planta posee el mecanismo de producción de estas proteínas en respuesta a la mayor concentración de MP registrados en su rizosfera, particularmente Cd. Estas proteínas son producidas por el micelio de HMA al descomponerse en el suelo, y se encuentra también en las esporas, las cuales son más abundantes en ZC, lo cual justificaría el mayor valor de PSAG-FE en ZC. (González-Chávez et al, 2011) mencionan que las PSAG participan en el secuestro de MP y promueven la descontaminación de los suelos disminuyendo su concentración. Nuestros resultados sugieren que la producción de Glomalina y las proteínas del suelo asociadas a ella, es una de las estrategias que facilita a *C.procera* su tolerancia a los ambientes contaminados por metales pesados, en los que la asociación micorrizica arbuscular ejerce un papel destacado.

CONCLUSIONES

La caracterización de los contaminantes en el suelo rizosférico demuestra que existe toxicidad por el ión Cadmio, ya que las concentraciones detectadas son mayores a los que límites permisibles por los organismos internacionales de protección al ambiente (UESPA, 2015).

Las concentraciones de MP afectan de manera negativa los propágulos asociados a los HMA, y se observa en la disminución de los valores correspondientes a longitud del micelio y la colonización micorrízica de *C. procera* en ZC.

La composición comunitaria refleja la dominancia de los morfotipos asociada a la familia de las *Glomeraceae*, observándose más del 80% de la distribución en ZC y dominando en un 90% en ZNC, lo cual demuestra que esta familia de los hongos Glomeromycota es tolerante a las concentraciones de Cadmio en el suelo.

Las PSAG son indicadoras de la presencia de los hongos Glomeromycota. Los valores de la PSAG- FE en ZC muestran la respuesta del sistema planta y HMA en presencia de la concentración de cadmio en el suelo. El incremento de PSAG-FE facilitaría la tolerancia de la planta permitiendo su persistencia en zona contaminada por MP, representando esta una ventaja con respecto a las otras especies sensibles a las concentraciones de MP.

REFERENCIAS

Armenta C., A. D., E. Furrazola, S. F. Moreno, G. I. Ayala and A. Ochoa. Variación en el estatus micorrízico de leguminosas del Desierto Sonorense. *Rev. Cienc. Biol. Salud* 18, 52-55 (2016).

Barbosa, M.O., De Almeida - Cortes, J.S., Da Silva, S.I and De Oliveira, A.F.M. Seed oil content and fatty acid composition from different populations of *Calotropis procera* (Aiton) W.T.Aiton (Apocynaceae*). Journal of the American Oil Chemist Society* 91, 1433-1441 (2014).

Bradford, N.M. A rapid and sensitive method for quantitation micrograms quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Analytic Biochemistry* 72, 248-254 (1976).

Boddington, C.L., Basset, E,E., Jokobsen, I and Dodd, J.C. Comparison of techniques for the extraction and quantification of extra-radical mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi from Two Soils Containing Fine Particulate Matter. *Soil Biology. Biochemistry*. 31, 479-482 (1999).

Boutraa, T. Growth perfomance and biomass partitioning of desert shrub *Calotropis procera* under water stress conditions. *Research Journal Agriculture and Biological Science* 6 (1), 20-26 (2010).

CAB, Internacional. Forestry Compedium. Wallingford. UK: CAB internacional. (2005)

Cerdera, A.F. Desechos del mármol de residuo a recurso económico y ambiental. *Revista Nova Ciencias*, 14-19 (2009).

Cuenca, G., Cáceres, A., Oidrobo, G., Hasmin, Z and Urdaneta, C. Las micorrizas arbusculares como una alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia* 22(1), 23-29 (2007).

Curaqueo, G., Barea, J.M., Acevedo, E., Rubio, R., Cornejo, P and Borie, F. Effect of tillage system of arbuscular mycorhizal propagulos and physical properties in Mediterrean agroecosystem in central Chile. *Soil & Tillage Research* 113, 11-18 (2011).

Ferrol, N., Tamayo, E and Vargas, P. The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *Journal of Experimental Botany*. 67 (22), 6253–6265 (2016).

Giovanetti, M and Moose, B. An evaluation of techniques for measuring versicular-arbuscular infections in roots. *New Phytologyst* 84, 489-500 (1980).

González-Chávez, M. C., Ortega-Larrocea M.P., Carrillo-González, R., López-Meyer, M.,Xoconostle-Cázares, B., Gómez, S.K., Harrison, M.J, Figueroa-López,. MA., and Maldonado-Mendoza, I.E. Arsenate induces the expression of fungal genes involved in as transport in arbuscular mycorrhizal. *Fungal Biology* 115, 1197–1209 (2011).

Hunter, B.A., Johnson, M.S. and Thompson, D.J. Ecotoxicology of copper and cadmium in a contaminated grassland ecosystem. I. Soil and vegetation contamination. *J. App. Ecol* 24, 573–586 (1987).

ISTAS. Posibles afecciones y riesgos ambientales derivados de las emisiones procedentes de los hornos cementeros. España. 1-21(2002).

Krüger M., C. Krüger, C. Walker, H. Stockinger and A. Schüssler, Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from Phylum to species level. *New Phytologist* 193, 970-984 (2012).

Mack, R.N. A Biotic Invasion: Causes, Epidemiology, Global Consequences and Control Ecological Applications 10, 689-710 (2000).

Morton, J and Betivenga S.P. Levels of diversity in endomycorrhizal fungi (Glomales, Zygomicetes) and their role in defining 175 taxonomic and non- taxonomic group. *Plant and Soil* 159, 47-59(1994).

Phillips, J.M and Hayman, D.S Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and versicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessments of infections. *Trans.Brit, Mycol. Soc* 55, 158-161 (1970).

Prsanthis, S., Jalander, V and Mamatha, M. The vesicular arbuscular mycorhizal associations with two medicinal plant species in Telangana University Campus, Nizamabad (T.S) India. *International Journal Current Research Biosciences and Plant Biology* 3 (1), 62-65 (2016).

Ramirez L, H. H. Determinación de metales pesados (Fe, Al, Cu, Cr, Co, Zn, Cd, Pb, Ni, Mo, V y As) en suelos del Estado Vargas, Venezuela. Tesis de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela (2008).

Rivas, R. Ecofisiología e Anatomia de *Calotropis procera* sob estreses abiótico. Universidad Federal de Pernambuco. Récife. Pernanbuco. Brazil (2016).

Sieverding, E. *Vesicular- Arbuscular Mycorhizas management in tropical agroecosystems*. GTZ. Rossdorf. Germany, 79-85 (1991).

Salmerón S, I.A., Pedraza S, M.E., Mendoza O, L.S and Chávez B., A. T. Cronología de la Taxonomia y Cladística de los Glomeromicetos. *Revista Fitotécnica México* 38 (2), 153-163 (2015).

Santos, A., Villegas, N and Betancourt, J. Residuos de mármol como insumo en la construcción civil- diagnóstico de la Comarca Lagunera 12 (22), 18-26 (2012).

Shüβler, A.,Krüger, M and Walker, C. Revelating natural relationships among arbuscular mycorhizal fungi: Culture line BCG47 represents *Diversoporas epigaeae* not *Glomus versiforme*. *LoS ONE* 6:e23333 (2011).

Toro, M and Andrade, G., Arbuscular micorhizae beneficial microorganims for sustainable agricultura. W. Leal Filho et al. (eds.) *Life on Land, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, 1-4 (2020).

United States Environmental Protection Agency (US EPA). Cleaning up the Nation's Hazardous Wastes Sites (2014). http://www.epa.gov/superfund

Wright, S.F and Upadhyaya, A. A survey of soil for aggregate stability and glomalina a glycoprotein by hyphae of arbuscular mycorhizal fungi. *Plant Soil* 198, 97-107 (1998).

Wright, S.F. Nichols, K.A and Schmidt, W.F. Comparison of efficacy of three extractants to solubilize glomalina on hyphae and in soil. *Chemosphere* 64, 1219-1224 (2006).

Zhu, W and Gibbs, J.C. Used different limestone and chalk powder in self-compactig concrete. *Cement. Concr. Res* 35 (08), 1457-1650 (2005).

TOLERANCIA DEL VETIVER (*Chryzopogon zizanioides*) A SUELOS CONTAMINADOS CON CRUDO EXTRAPESADO

Rosas J.[a,b], García A.[a], Inojosa Y.[a], De Sisto A.[a], España M.[a]

[a]*Dirección de Energía y Ambiente, Fundación Instituto de Estudio Avanzados (IDEA), Caracas, VENEZUELA*

[b] *Instituto de Zoología y Ecología Tropical (IZET), Universidad Central de Venezuela, Caracas,VENEZUELA*

e-mail: jesmaryrosasb@gmail.com

RESUMEN

Chryzopogon zizanioides L. Nash (Familia Poaceae) comúnmente llamada Vetiver, originaria del Asia, es utilizada en la fabricación de fármacos y cosméticos, también es empleada como barrera viva, ya que su capacidad de enraizamiento facilita la estabilidad de taludes expuesto a las erosiones eólicas e hídricas, mejorando la estructura física al suelo. Esta planta se caracteriza por su adaptación en suelo con variaciones de pH, además, tienen características morfológicas ideales para la fitorremediación de contaminantes orgánicos y alta afinidad por las micorrizas arbusculares. Se ha reportado en diversas investigaciones a C.zizanioides en la recuperación de suelos impactados con crudo y lodos petrolizados. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo fue, evaluar la tolerancia de C. zizanioides inoculadas con micorrizas arbusculares (HMA) comercial en suelo impactado con diferentes dosis de crudo extrapesado proveniente de la Faja petrolífera del Orinoco en la región oriental de Venezuela. Se emplearon tres diluciones de suelo como tratamientos (TPH2, TPH4 y TPH8), evaluándose a los 180 días los siguientes parámetros en las plantas: altura, longitud radical y número de esquejes. Las alturas en las plantas para TPH2 alcanzan un promedio de 27 cm, TPH4 alcanzaron 25,5 cm y TPH8 de 22,5 cm, el número de esqueje promedio por plantas fueron 4 indv/ planta (TPH2), 5 indv/planta (TPH4) 3 indv/ planta (TPH8), y la longitud radical promedio para TPH2 fue 50 cm, 60,5 cm en TPH4, y TPH8 de 75 cm. Los resultados reflejan diferencias mínimas significativas entre tratamientos, lo cual sugiere que la planta micorrizada muestra tolerancia a diferentes dosis de crudo extrapesado presente en el suelo, siendo una posible estrategia de recuperación de áreas impactadas por este tipo de crudo.

Palabra Clave: Vetiver, crudo extrapesado, micorrizas arbusculares, índices agronómicos

INTRODUCCIÓN

La actividad industrial ha ocasionado uno de los problemas más serios en materia de contaminación de suelos, donde el derrame de hidrocarburos derivados del petróleo ocupa uno de los primeros lugares en el mundo (Prado et al, 2011).

Venezuela es un país productor de petróleo, la explotación del crudo ha causado diversos impactos ambientales especialmente por los procesos de refinación, perforación, producción y derrames accidentales (Brandt et al, 2006). Actualmente, existe un creciente aumento en el desarrollo, utilización de diferentes métodos y tecnologías sustentables así como normativas estrictas, lo que ha logrado disminuir la descarga de contaminantes al ambiente (Guevara et al, 2018; Garzón et al, 2017). Por tanto, se han desarrollado distintas estrategias dirigidas a la prevención y recuperación

de las áreas contaminadas por crudo, donde se incluyen las metodologías fisicoquímicas y las biológicas.

La biorremediación es una herramienta biotecnológica, basada en la aplicación de sistemas biológicos con la finalidad de neutralizar sustancias tóxicas (Plaza et al, 2001; Schmidt, 2000). Ésta es una de las tecnologías que actualmente se está aplicando, ya que es considerada limpia y amigable con el ambiente además de su bajo costo (Guevara et al, 2018). Dentro de las diversas técnicas de biorremediación se encuentra la fitorremediación (plantas) y la micorremediación (hongos micorrízicos) (Benavides et al, 2006).

En particular la fitorremediación es una de las técnicas emergente que pretende mitigar los problemas de contaminación con el uso de plantas (López- Jiménez et al, 2020) y la micorremediación es otra de las técnicas empleadas en la remediación de suelos contaminados, donde los hongos micorrizícos arbusculares (HMA) están asociados simbióticamente con plantas y en conjunto promueven la degradación de sustancias orgánicas tóxicas, y a su vez facilitan la incorporación de algunos compuestos como fuente de nutrientes tal como el nitrógeno, el fósforo y otros elementos que no representan riesgo de toxicidad para la planta (Barun et al, 2015).

La aplicación de la fitorremediación y la micorremediación ha demostrado buenos resultados, ya que se ha observado la disminución de la concentración de contaminantes presente en el suelo (Merlos et al, 2016; Li et al, 2016). El empleo de los HMA en alianza con plantas fitorremediadoras, ha sido una estrategia novedosa en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburo. Se han realizado estudios caracterizando a diversas especies fitorremediadoras, considerando su capacidad de metabolizar o inmovilizar el crudo, además de inducir el crecimiento de poblaciones de microorganismo en la rizósfera, también, su afinidad por estar en asociación con algunos de ellos, destacando los HMA. La asociación planta-HMA tiene muchas ventajas y una de ellas tiene que ver con la adaptación a la toxicidad del contaminante y su posterior biodegradación (Gamarra, 2014; Perez et al, 2002). Algunos ensayos muestran tal efecto como el realizado con *L. multiflorum* inoculado con HMA cultivado en un suelo contaminado con crudo, donde los autores señalan que la planta micorrizada aumenta la producción de una proteína asociada a los HMA, relacionada con inducir la acumulación del hidrocarburo en la raíz y favoreciendo su biodegradabilidad (Gao et al, 2018).

En Venezuela, se han desarrollado varios ensayos con plantas con capacidad fitorremediadoras, reportándose más de cincuenta y siete especies, entre las cuales se encuentran gramíneas, herbáceas y fabáceas (Merkl et al, 2004). El pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L Nash) perteneciente a la familia de las Poaceae, es una de las gramíneas que ha sido empleada como planta fitorremediadora de metales pesados, además es tolerante a la presencia de crudo pesado, ya que la planta es capaz de reproducirse y reducir el contaminante, el mecanismo de tolerancia y persistencia de este pasto en suelos contaminados con crudo se encuentra asociado a la presencia de microorganismos (bacterias y HMA) en la rizósfera (Brand et al., 2006).

Una de las maneras de evaluar la respuesta planta-HMA frente a un contaminante, es a través del uso de indicadores agronómicos asociados a la planta tales como: la altura de la planta, número de esquejes, longitud radical, diámetro de la macolla, así lo señalan Rosas (2008) y Rosales et al. (2015) quienes realizaron ensayos utilizando lodos petrolizados y suelos impactados con crudo.

En este contexto el presente trabajo e investigación tiene por objetivo evaluar la tolerancia del vetiver *(C. zizanioides)* inoculado con micorrizas arbusculares (HMA) en un suelo impactado con diferentes dosis de crudo extrapesado, proveniente de la Faja Petrolífera del Orinoco, mediante la determinación de diferentes índices agronómicos

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Preparación de las muestras de Suelo: El suelo impactado con crudo extrapesado, se recolectó de una zona adyacente a una fosa petrolera ubicada en el Tigre, Estado Anzoátegui (Faja Petrolífera del Orinoco-Venezuela). Estimándose el TPH (Hidrocarburos totales de petróleo) de este suelo en 16. De igual manera, se obtuvo una muestra de suelo libre de hidrocarburos cercanas a la fosa, ambas muestras fueron preservadas a 4°C, en la Dirección de Energía y Ambiente, Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), Estado Miranda- Venezuela.
Posteriormente, se realizaron diluciones sólido- sólido (suelo impactado – suelo limpio), empleando distintas proporciones para obtener tres concentraciones diferentes para cada uno de los tratamientos del ensayo experimental.
TPH 8: 50% del suelo impactado con TPH 16 y 50% del suelo limpio
TPH4: 25% del suelo impactado con TPH16 y 75% del suelo limpio.
TPH2: 12,5% del suelo impactado con TPH16 y 87,5% del suelo limpio.

Obtención y Preparación de los esquejes de *C. zizanioides:* Los esquejes o semillas de *C. zizanoides* se obtuvieron de 3 plantas adultas con varios esquejes, cultivadas en el invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (UCV), estas se trasladaron a la Dirección de Agricultura y Soberanía Alimentaria (ASA) en la Fundación Instituto de Estudio Avanzados (IDEA). En el invernadero, se mantuvieron en una maceta temporal, por 3 semanas, una vez transcurrido el tiempo se procedió a separar los esquejes de las plantas nodrizas, se lavaron para retirar el sustrato, se cortaron el exceso de raíces y se le llevaron todos a una altura de 10 cm. Una vez separados de la macolla se seleccionaron un grupo de esquejes para ser trasplantados en un semillero con suelo estéril y posteriormente inoculados con hongos de micorrizas arbusculares (HMA), con la finalidad de inducir la simbiosis para el bioensayo (tratamientos y los controles positivos). Los restantes fueron cultivados en suelo estéril para ser utilizados como controles negativos.

Inóculo de hongos de micorrizas arbusculares (HMA): El inóculo empleado para el ensayo de tolerancia fue donado por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), el cual fue elaborado a base de HMA perteneciente a la familia de las *Glomeraceae*, este inóculo fue cultivado en un sustrato estéril para ser utilizado como biofertilizante.

Diseño experimental: En la siguiente tabla se muestra el diseño experimental del ensayo de tolerancia

Tabla I. Diseño experimental de tolerancia con *C.zizanoides*

Tratamientos	**TPH2**	**TPH4**	**TPH8**	**Control +**	**Control -**
Repeticiones	6	6	6	6	6

*TPH2: contiene 12,5% de crudo diluido en suelo limpio + 10g de inoculo de HMA
**TPH4: contiene 25% de crudo diluido en suelo limpio+ 10g de inoculo de HMA
***TPH8: contiene 50% de crudo diluido en suelo limpio+ 10g de inoculo de HMA
****Control (+): suelo no contaminado+ 10g de inoculo de HMA
*****Control (-): Suelo estéril.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente tabla se resume los resultados de la medición de los índices agronómicos

Tabla II. Índices agronómicos evaluados en las plantas de *C.zizanioides* cultivados en suelos a diferentes dosis de crudo extrapesado

Tratamientos	**Índices Agronómicos**			
	Altura de la planta (cm)	**Longitud radical (cm)**	**Número de esquejes/ plantas**	**Diámetro de la macolla (cm)**
C+	14,5 ± 1,5 **a**	40,3 ± 6,4 **a**	6 ± 1,5 **a**	27,6 ± 2,3 **a**
C-	10,7 ± 0,6 **b**	17 ± 7,7 **b**	2 ± 0,6 **b**	20,3 ± 1,5 **b**
TPH2	27 ± 4,3 **c**	50 ± 3,7 **c**	4 ± 1 **c**	25,3 ± 3,2 **ca**
TPH4	25,5 ± 2,4 **c**	60,5 ± 3,8 **c**	5 ± 1,5 **cd**	24,7 ± 0,6 **cd**
TPH8	22 ± 2,9 **ce**	75 ± 1,6 **ce**	3 ± 1,7 **ce**	23,3 ± 0,6 **ce**

*Valores promedio por cada tratamiento, +/- Desviación Estándar
** Prueba ANOVA de una vía y Prueba Tuckey ($p<0,05$). Letras diferentes entre la misma columna tienen diferencias significativas
a: control positivo (C+), **b**: control negativo (C-), **c**: TPH2, **d**: TPH4, **e**: TPH8, **ca**: TPH2=control positivo (C+), **cd**: TPH2=TPH4≠Controles (+ y -), **ce**: TPH8=TPH4=TPH2 ≠ Controles (+ y -)

La tabla II muestra los valores relacionados con las alturas de las plantas *de C. zizanioides* cultivadas en suelos con diferentes dosis de crudo y sus controles, en ella se observan las máximas alturas en el tratamiento TPH2, seguido del TPH4 y el TPH8, por último los controles registran los valores más bajos, siendo el control positivo (C+) mayor al control negativo (C-). Con estos resultados obtenidos se observan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y los controles. Estas alturas observables en los tratamientos puede ser una respuesta al aprovechamiento de los nutrientes móviles y disponibles en la rizósfera, la presencia de las micorrizas facilita la incorporación de éstos a la planta, por lo tanto, se ve reflejada en el incremento en las altura de la planta. Cao et al (2015) mencionan que los microorganismos asociados a la rizósfera contribuyen a la degradabilidad del contaminante y favorece su tolerancia a las concentraciones, esa es una de las ventajas de la presencia de los HMA en la rizósfera de *C.zizanioides.*

La longitud radical de las plantas es otro de los indicadores medidos, el tratamiento TPH8 es el que registró el máximo valor (75 cm) mostrando diferencia significativa con respecto a los tratamientos TPH2, TPH4 y los controles. Particularmente el control negativo mostró el menor valor, siendo significativamente diferente en relación a todos los tratamientos. Estos resultados pueden estar sugieren que la actividad de los microorganismos en este caso la presencia de los HMA, está favoreciendo la movilidad de nutrientes (fosfatos presentes en el suelo) y esto es aprovechado por la planta, a pesar de la presencia del hidrocarburo, lo incorpora y se ve reflejado en la altura y en la longitud radical. Resultados similares fueron reportados por Brandt (2006), en un ensayo con *C. zizanioides* en suelo con crudo, donde obtuvo un comportamiento similar, con el uso de compost como fertilizante. Por otra parte, *C. zizanioides* se caracteriza por la alta producción de raíces, Toro et al (2017) reportan que la presencia de la concentración de hidrocarburo puede estar limitando el crecimiento de la planta (vástago), sin embargo, la presencia de los HMA induce el incremento de la biomasa radical, ya que aumenta la producción de raíces secundarias sensibles a la colonización por los HMA, lo cual favorece la toma de los nutrientes móviles, además, facilita la activación de mecanismos fisiológicos implicados en la rizodegradación. Esto se observa en el tratamiento TPH 8.

La producción de nuevos esquejes refleja indirectamente la supervivencia de la planta, los resultados obtenidos muestran al C+ con más esquejes vivos seguido de TPH4, TPH2 y TPH8 y por último el C-, observándose diferencias significativas entre los controles y tratamientos. Los resultados indican que el sistema planta- micorrizas puede estar tolerando la toxicidad del hidrocarburo, ya que hay nuevos esquejes presentes en cada microcosmo correspondientes a los tratamientos.

Por último, se evaluó el diámetro de la macolla, el cual muestra el mayor valor en el control positivo seguido de los tratamientos TPH2, TPH4 , TPH8, y por último el control negativo el cual alcanza el menor valor del diámetro de la macolla. Los tratamientos con crudo y los controles, muestran diferencia significativas entre ellos. En general, todos los resultados obtenidos en los indicadores agronómicos medidos en las plantas *C.zizanioides*, están mostrando la respuesta de las plantas micorrizadas frente a la presencia del hidrocarburo en el suelo, lo que corrobora que la asociación simbiótica las plantas/ HMA, favorece la tolerancia de este pasto a las concentraciones de crudo en cada uno de los tratamiento.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en la determinación de los diferentes índices agronómicos sugieren que las micorrizas arbusculares tienen un papel importante en la tolerancia que presentó la gramínea Vetiver, a diferentes dosis de crudo extrapesado ya que dichos HMA estimulan la proliferación de los microorganismos presentes en la rizósfera de la planta, lo que contribuyó significativamente en la captación de nutrientes y agua potenciando la capacidad fitorremediadora de la planta. Por lo tanto, el acoplamiento de micorrizas-Vetiver tiene una alta viabilidad de ser empleada para el saneamiento de suelos impactados con hidrocarburos.

REFERENCIAS

Alarcón, A and Ferrera, R. Ecología, fisiología y biotecnología micorriza arbuscular. Mundi-prensa. Universidad Autónoma de Chapingo. México: Capingo. (2000).

Alemán P, R.D., Domínguez B, J., Rodríguez G, Y and Soria Re, S. Indicadores morfológicos y productivos del cultivo de tomate en invernadero con manejo agroecológico en las condiciones de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola* 43 (1). 71-76. (2016)

Barun K, M., Sumita, P., Sumita K,M.,Rnajeet S, Y., Alvina F, H.B and Amitava, R. Mycorhizoremediation of nickel and cadmiun: A promising technology. *Natures Environment and Pollution Technology* 15 (2). 647-652. (2016)

Benavides López de Mesa; MSc, J., Quintero, MSc, G., Guevara Vizcaíno, A. L., Jaimes Cáceres, D. C., Gutiérrez Riaño, S. M., and Miranda García, J. Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova* 4(5). 82-90(2006). https://doi.org/10.22490/24629448.351

Brandt, R., Merkl, N., Schultze, R. and Infante C. Potential of vetiver (L. Nash) for phytoremediation of hydrocarbon contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation* 8, 273-284. (2006).

Cao, J., Digge, J and Wang, C. Interaction between earworms and arbuscular micorhizal fungi on the degradation of oxytetracycline in soil. *Soil Biol Biochem. 90.283-292 (2015)*

Chen, Y., Shen, Z., and Li, X. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry*, 19 (10), 1553–1565. (2004)

Cumana, A and Torrealba, O. Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1 (2), 175–188. (2010).

Delon, F. Hidrocarburos origen y acumulación. Petróleos de Venezuela, SA. Programa de educación petrolera. *Litografía Beta*. 14.(2001).

Gamarra C, R.E. Factibilidad del uso de la asociación de planta-hongo Glomeromycota en la biorestauración de suelo en un suelo contaminado con hidrocarburo. Facultad de Agronomía. Comisión de Estudios para Graduados. Postgrado de Ciencias del Suelo. Maracay. Venezuela (2014)

Garzón, J.M., Rodríguez-Miranda, J.P and Hernández-Gómez, C. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Rev Univ. Salud*. 19 (2). 309-318 (2017)

Gao, Y., Chen, S., Wang, J and Gatheru W, M. Glomalin-Related soil protein influence accumulation polycyclic aromatic hydrocarbons by plant root. *Science of the Total Enviroment*, 644. 465-473 (2018).

Hutchison, S.L.,Banks, M.K and Schwab, A.P. Phytoremediation of aged petroleum sludge: Effect of inorganic fertilizer. *J. Environ. Qual*, 30. 395- 403 (2001)

Hernández, I and Mager, D. Uso de Panicum maximum y Brachiaria brizantha para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. *Bioagro*, 15 (3). 149-155 (2003).

Infante, C. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos. Guía de apoyo de Curso UCV. Postgrado de Ciencias del Suelo. (2007)

Li, H., Luo, N. Zhang, L. J. H. . Zhao., M. Y. Li, W. Q., Cai, Y., Wong, M. H and Mo , C. H. Arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice *Sci. Total Environ*, 571. 1183-1190 (2016). doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.124

Lopez J, M., Martínez H, J and Argüello G, E. Fitorremediación: Una estrategia tecnologías para recuperación de suelos suereste. https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Herrera13/publication/344177780_FITORREMEDIACION_UNA_ESTRATEGIA_TECNOLOGICA_PARA_LA_RECUPERACION_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_EN_EL_SURESTE/links/5f591fa6299bf1d43cf8f90d/FITORREMEDIACION-UNA-ESTRATEGIA-TECNOLOGICA-PARA-LA-RECUPERACION-DE-SUELOS-CONTAMINADOS-EN-EL-SURESTE.pdf
(Visitado Octubre 2020)

Merlos, M. A., Zitka, O., Vojtech, A., Azcón-Aguilar, C and Ferro, N. The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* differentially regulates the copper response of two maize cultivars differing in copper tolerance. *Plant Sci*, 253. 68-76 (2016). doi: 10.1016/j.plantsci.2016.09.010.

Merkl, N., Schultze, R and Infante C. Phytoremediation of petroleum contamined soils in the tropics- pre-selection of plant species from eastern Venezuela. *Journal of Applied Botany and Food Quality*,(78).185-192 (2004)

Plaza, G., Otero, M., Torres, N., Velásquez, M., Corbalan, E and Rodriguez, T. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5.163-167 (2001)

Prasad, M.N., Freitas, H., Fraenzle, S., Wuenschmann, S and Markert, B. Knowledge explotion in phytotechnologies for environmental solutions. *Environ Pollut*. 158(1).18–23 (2010)

Perez, J., García, E and Esparza, F. Papel ecológico de la flora rizosférica en fitorremediación. *Avances y Perpesctivas* 21. 297-300 (2002).

Schmidt W. Suelos contaminados con hidrocarburos: la Biorremediación como una solución ecológicamente compatible. *Cooperación Técnica Alemana* (GTZ). (2000). En: www.gtz.org.mx/sitios-contam/articulos/biorremed_Mex2.pdf

Rodriguez, J and Sánchez, J. Biorremediación: Fundamentos y aspectos microbiológicos. *Industria y minería*, (351).12-6 (2003)

Rosales, Y., Acosta, Y., El Zuahre, M., Mogollon, P and Zamora, F. Parámetros agronómicos en pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L) cultivado sobre un aridisol impactado con lodo petrolizado y tratado con compost. REDIELUZ 5 (1,2). 38-42 (2015)

Rosas, J. Aplicación del Vetiver y las micorrizas arbusculares como una estrategia de recuperación de suelos marginales. Edo Miranda-Venezuela. Escuela de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela (2008)

Toro, M., Gamarra, I., López, L and Infante, C. Arbuscular mycorrhizal fungi and remediation in soil contaminated whit hydrocarbons. Chemical control whit microorganism. Pollution science , technology abatement. *NOVA*. New York. Chapter 3. 79-97. (2017)

Truong, P. N. La tecnología del pasto vetiver para protección ambiental.(1999). En: http: //www.vetiver.org/lavn_prot%20amb.html.

VARIACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN EL ACUÍFERO COSTERO DE VILLA GESELL, ARGENTINA: RESULTADOS PRELIMINARES

Sánchez Caro L.[a,b], Carretero S.C.[a,b], Fabiano M.[b,c], Laurencena P. [b,c] e Isla F.I.[a,d]

[a]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*
[b]*Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), ARGENTINA*
[d]*Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMYC), Mar del Plata, ARGENTINA*

e-mail: leonardo.sanchezcaro@gmail.com

RESUMEN

El Partido de Villa Gesell se ubica sobre la barrera medanosa de la Provincia de Buenos Aires. El acuífero costero representa la única fuente de agua dulce para la población. Como primera aproximación al estudio del agua freática en la zona, se realizó un total de 24 freatímetros distribuidos en los 48 km^2 del área de estudio, en los cuales se efectuaron mediciones de nivel freático, conductividad eléctrica y temperatura en enero y marzo de 2020. Para conocer y contrastar las condiciones hidrológicas previas a las dos campañas de medición, se calcularon balances hidrológicos de paso diario teniendo en cuenta el tipo de cobertura (bosque o médano). Los resultados muestran que los excesos de agua pueden considerarse despreciables para el período analizado. En este contexto, se registraron descensos del nivel freático de entre 5 y 35 cm, en 15 de los 17 pozos medidos en ambas campañas. Los pozos ubicados en zonas de bosque y de médano presentaron valores medios de variación de niveles similares, si bien los correspondientes a la zona de médano presentan mayor dispersión. Los pozos en zonas urbanas registraron una menor variabilidad de niveles entre enero y marzo. La conductividad eléctrica aumenta hacia la costa con un valor máximo de 542 µS/cm, lo cual resulta apto para consumo humano. El presente trabajo es una aproximación inicial al comportamiento del acuífero freático en este sector de la costa bonaerense, y es resultado de las primeras mediciones en una red de monitoreo recientemente construida. En el futuro serán instalados más freatímetros para obtener una mayor densidad de datos.

Palabras Clave: Acuífero Costero, Agua Subterránea, Uso del Suelo.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras revisten una gran importancia desde un punto de vista ambiental y económico, debido a que buena parte de la población mundial se ubica cercana a la costa (Satkunas, 2008). Incluso cuando presentan pequeñas dimensiones, los acuíferos costeros constituyen fuentes de agua dulce altamente productivas para el uso humano (Custodio, 2010), sin embargo, suelen también tratarse de sistemas particularmente vulnerables a la acción antrópica. Algunos problemas comunes en Sudamérica respecto del manejo de acuíferos costeros, son la explotación intensiva del agua subterránea, la ausencia de estudios base para el manejo y planificación del uso del recurso hídrico, y la ausencia de redes de monitoreo del agua subterránea (Bocanegra, 2009).

En la costa oriental de la provincia de Buenos Aires, la expansión demográfica y la urbanización caótica de las múltiples localidades turísticas de la zona, han resultado en un aumento de la demanda de agua dulce durante las últimas décadas (Kruse et al, 2012). Varias zonas de la costa oriental bonaerense cuentan con estudios exhaustivos acerca del funcionamiento del sistema hidrogeológico costero (Carretero, 2011; Rodrigues Capitulo, 2015; Gómez, 2017 a, b), sin embargo, este no es el caso del Partido de Villa Gesell. Las localidades balnearias de este partido dependen exclusivamente del agua subterránea para el abastecimiento de la población, a su vez, la actividad turística se suma como un factor de presión sobre el recurso hídrico. Se reconoce la necesidad de contar con un estudio detallado del sistema acuífero en la zona. Mediante la instalación de una red de monitoreo, la toma sistemática de datos y la aplicación de metodologías de análisis con una perspectiva multi-enfoque, se espera obtener un producto de aplicación directa al manejo del recurso hídrico en Villa Gesell.
El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio preliminar del acuífero freático en Villa Gesell, analizando el comportamiento del nivel freático y la influencia que la cobertura del suelo ejerce sobre el mismo.

ÁREA DE ESTUDIO

El Partido de Villa Gesell es uno de los 135 partidos de la Provincia de Buenos Aires. se encuentra emplazado en la región geomorfológica conocida como cordón costero, en la costa atlántica de bonaerense (ver Fig. 1), centrado en las coordenadas 37° 15’ S y 57° 56’ O. La zona de estudio abarca los sectores urbanizados y/o forestados del Partido de Villa Gesell, que incluyen la localidad homónima (cabecera del Partido) al noreste y las localidades de Mar de las Pampas y Mar Azul, hacia el sudoeste. Hacia el noroeste, fuera de los límites del cordón costero, dentro de la llanura continental, se encuentra el partido de General Madariaga. En el año 2010, Villa Gesell contaba con 31.730 habitantes (INDEC, 2010). Se estima que la población estable del Partido para el año 2020 es de aproximadamente 38.000 habitantes (INDEC, 2020a). Además, al tratarse de una zona balnearia, debe tenerse en cuenta el aumento estacional de la población debido a la avenida turística en la época estival: entre los meses de enero y febrero, el Partido de Villa Gesell recibe entre 130.000 y 170.000 turistas (2014-2017) (INDEC, 2020b).
El cordón costero presenta en esta región poco más de 3 km de ancho; y en el sector central las dunas se elevan hasta aproximadamente 20 msnm (Bértola, 2002; Marcomini, 2002). El área de estudio se encuentra dentro de la Región II definida por el Consejo Federal de Inversiones (CFI, 1990). Esta región presenta características geomorfológicas particulares, que tienen un fuerte impacto en su comportamiento geohidrológico. Rodrigues Capitulo, 2015 definió un modelo hidrodinámico para la localidad de Pinamar, que forma parte de la Región II y se ubica a pocos kilómetros del área de estudio. Según este modelo, la recarga de agua subterránea es de índole local y directa a partir de las precipitaciones. Dada la alta permeabilidad del sustrato arenoso, se considera nulo el escurrimiento superficial, de forma tal que los excesos de agua contribuyen en su totalidad a la infiltración. Una vez alcanzada la zona saturada, el agua se mueve desde la zona central del cordón hacia ambos bordes del mismo. Del lado oeste, una zona de interface separa el agua dulce del cordón costero del agua salobre contenida en los sedimentos de la llanura continental. Del lado este, se registra una interface entre el agua dulce y el agua salada del mar. Esta última fue identificada en el Partido de Villa Gesell por Hurtado et al, 1987 mediante la realización de estudios geoeléctricos.

En esta zona el acuífero freático se aloja en el cordón arenoso, el cual se originó durante el Holoceno como resultado de la acción conjunta de procesos costeros y procesos eólicos vinculados a la generación y migración de dunas costeras (Isla et al, 1996; Violante y Parker, 1992; Violante et al, 2001). El acuífero costero constituye la única fuente de agua potable para la población.

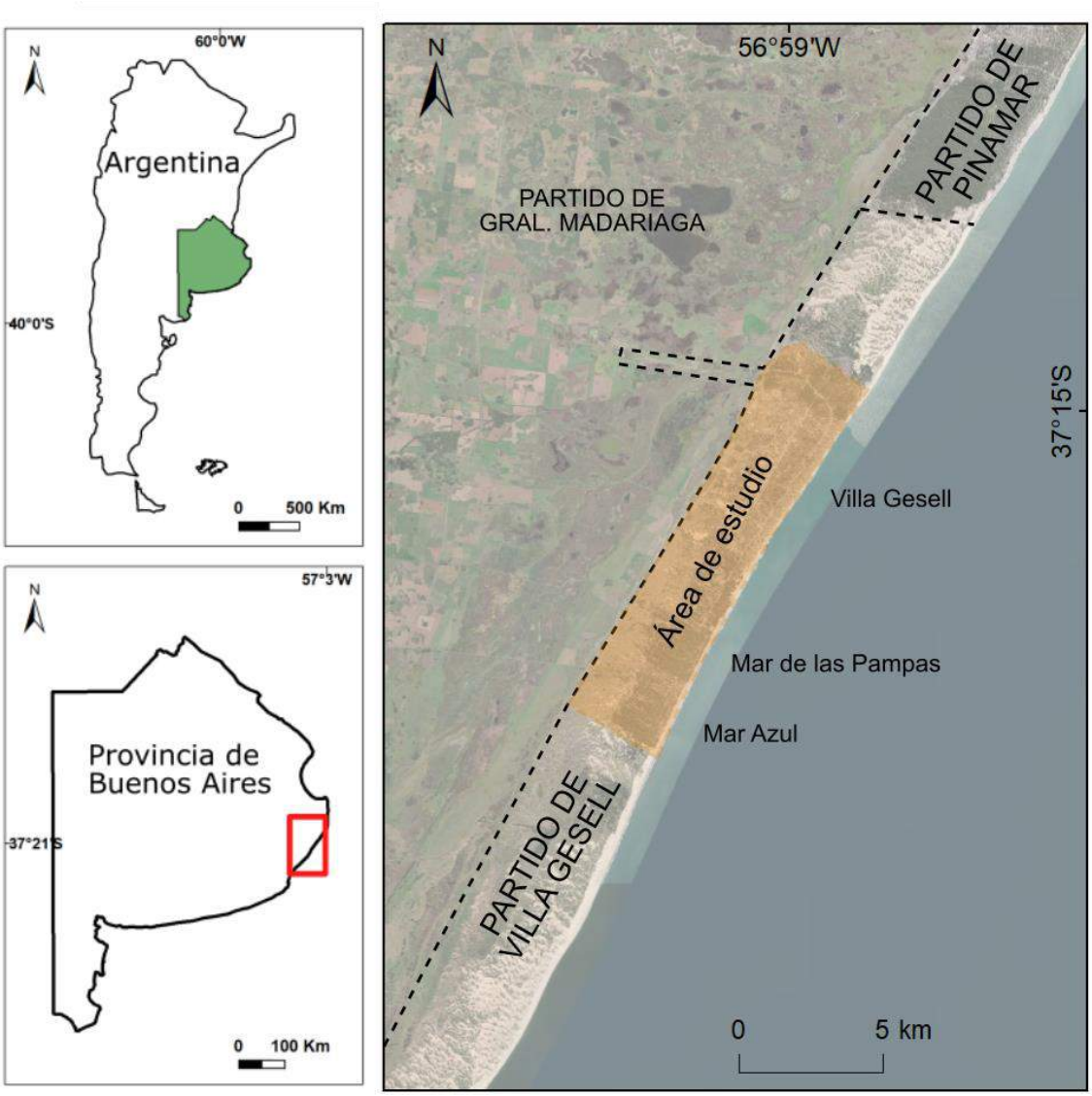


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo, se realizaron tareas de campo para la obtención de datos, y una posterior elaboración de los mismos a través de software especializado.
Se llevaron a cabo dos campañas durante los meses de enero y marzo de 2020. En la primera, se perforaron 17 freatímetros distribuidos entre las localidades del Partido de Villa Gesell. Para las perforaciones, se empleó el método de hincado de cañería y remoción de material con broca dentada (ver Fig. 2a). Se instalaron freatímetros de PVC de 63 mm de diámetro, ranurados manualmente con sierra de acero cada 5 cm, aproximadamente. Las perforaciones alcanzaron una profundidad de entre 3,5 y 5,5

metros. En la segunda campaña, y mediante el mismo método, se adicionaron 7 pozos más a la red de monitoreo. A su vez, se tomaron datos de profundidad y conductividad eléctrica del agua in situ de los freatímetros realizados previamente. Para la medición de la conductividad, se utilizó un conductivímetro portátil modelo PCD-431 de Lutron. La Fig. 2b muestra la ubicación de los 24 freatímetros perforados, distribuidos sobre los 48 km^2 del área de estudio. La implementación del Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio (ASPO) en marzo de 2020, forzó la interrupción de la segunda campaña. Debió postergarse la realización de parte de los pozos, así como la nivelación altimétrica de los mismos. Por esto último, el tratamiento y análisis de los datos de nivel freático obtenidos sólo pudo ser llevado a cabo en términos de profundidad desde la superficie topográfica.

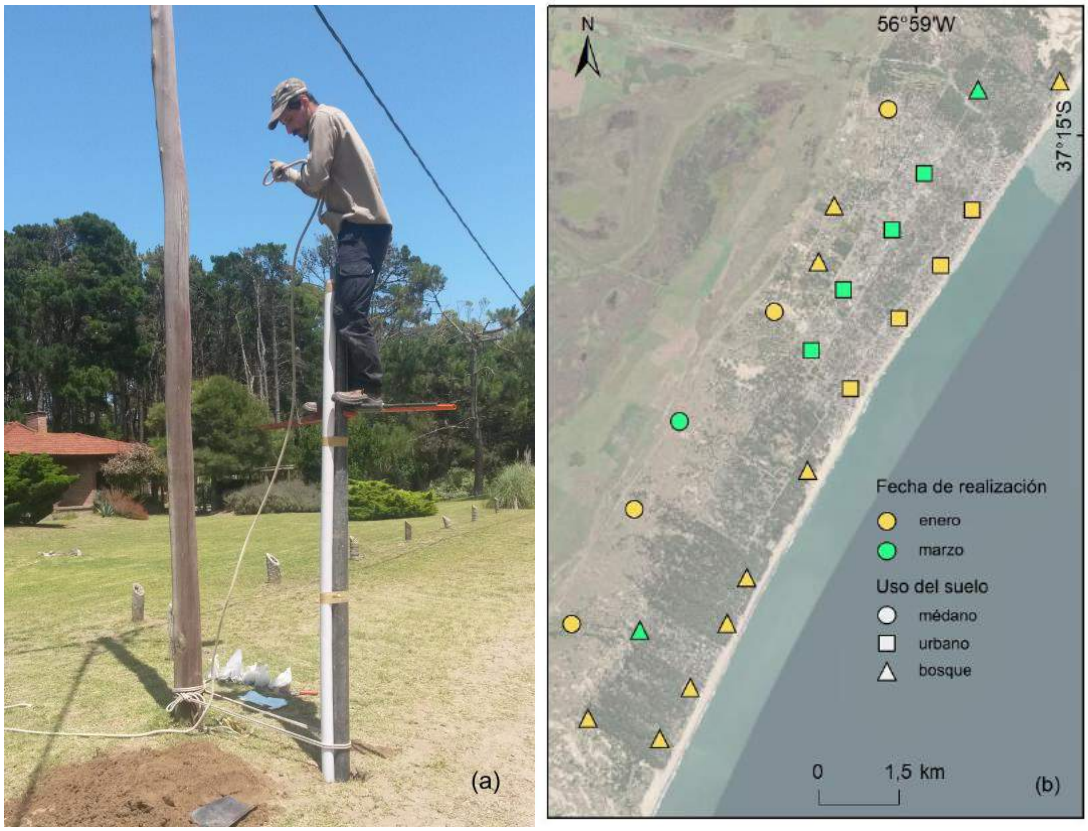


Figura 2. **a.** Realización de perforaciones manuales. **b.** distribución final de los freatímetros.

Los datos obtenidos se volcaron en ArcGIS 10.2.2 para su elaboración y posterior interpretación. Se generaron mapas de profundidad de nivel freático para enero y marzo, de isovariación de nivel entre ambas mediciones, además de un mapa de conductividad para marzo. En todos los casos, el algoritmo utilizado para la interpolación de datos puntuales fue Nearest Neighbor.

Para conocer el contexto climático e hidrológico en el cual se enmarcan las mediciones de pozo, se realizaron balances hídricos según Thornthwaite y Mather, 1955, a partir de datos diarios de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional en Villa Gesell, desde enero de 2019 hasta marzo de 2020. Se consideraron tres tipos de cobertura: médano (suelo arenoso con escasa vegetación o sin ella), bosque (suelo cubierto por un bosque de coníferas) y urbano.

Se usaron valores medios diarios de evapotranspiración de referencia (ETo), estimados con la ecuación FAO Penman–Monteith, 1998. La evapotranspiración potencial (Etc) se calculó mediante la Ec. (1):

$$ETc = ETo \times Kc \quad (1)$$

donde ETc es la máxima evapotranspiración de la cobertura; ETo es la evapotranspiración de referencia y Kc es el coeficiente de cultivo o de cobertura.
La capacidad de campo (CC) media del suelo dominado por arena fue de 160 mm/m, según Falasca y Forte Lay, 2006, que definen un valor de 140 y 180 mm hasta una profundidad de 1 m a lo largo de la costa arenosa bonaerense. En el caso del médano, la profundidad efectiva asignada para el balance fue de 0,25 m y por lo tanto quedó definida una CC de 40 mm, dado que el efecto de la evapotranspiración no puede penetrar más profundo. En el caso del bosque, debió tenerse en cuenta una exploración de raíces de más de 1 m, ya que se trata de un bosque bien establecido, por ello, se asignó una profundidad de 1,25 m, que derivó en una CC de 200 mm en el balance. Se asumió que la intercepción contribuye en un 100% a la evapotranspiración (ET)
Se determinaron valores de Kc de acuerdo a FAO, 1998. Para la zona de médano se consideraron valores variables a lo largo del año, entre 0,45 en verano, y 1,2 en invierno. Para la zona de bosque se tomó Kc=1 constante todo el año (FAO, 1998; Besteiro, 2014).
Los valores de ETo y Kc adoptados fueron procesados con el software AGROAGUA v.5.0 (Forte Lay et al, 1995), con la precipitación diaria como dato de entrada. De esta manera, se obtuvieron los excesos diarios correspondientes a las zonas de bosque y médano, entre diciembre de 2019 y marzo de 2020. Los excesos para la zona urbana fueron estimados, siguiendo el criterio de Carretero et al, 2014, como un 15% del valor de excesos para la zona de médano.
Los datos de variación del nivel freático y de conductividad eléctrica fueron agrupados de acuerdo al tipo de cobertura del suelo presente en la zona del freatímetro correspondiente. Esto permitió evaluar el comportamiento de las variables de interés según dicho criterio, y plantear hipótesis acerca del posible control que las diferentes coberturas pueden tener sobre el nivel freático y la conductividad eléctrica en el acuífero freático de Villa Gesell.

RESULTADOS

Comportamiento de los niveles freáticos

La Tabla I muestra los balances hídricos para las coberturas de médano, bosque y urbano. Previo al trabajo de campo, los mayores excesos corresponden a la cobertura de médano, mientras que la zona urbana presenta excesos mínimos. Entre campañas, los excesos en la zona de médano disminuyen un 71%, con la correspondiente reducción de los excesos en zona urbana, que pasan a ser prácticamente nulos. La zona de bosque no presentó excesos durante el período considerado.

Tabla I. Balances hídricos para las zonas de bosque y médano, y excesos estimados para la zona urbana, para el periodo diciembre de 2019 y marzo de 2020. Todos los valores están expresados en mm.

		Médano			Bosque			Urbano
	P[1]	ETP[2]	ETR[3]	Excesos	ETP	ETR	Excesos	Excesos
Previo a primera campaña (dic 2019-ene 2020)	145	75,6	34,6	85	153	83,7	0	12,8
Entre campañas (ene-mar 2020)	112	161	95,9	24,5	289,4	173,5	0	3,7

[1]Precipitación; [2]Evapotranspiración Potencial; [3]Evapotranspiración Real.

Se obtuvieron mapas de isoprofundidad del nivel freático a partir de 17 mediciones en enero (ver Fig. 3a), y 24 en marzo (ver Fig. 3b). En ambos casos, las curvas de isoprofundidad se orientan de forma aproximadamente paralela a la costa. Se observan, en líneas generales, mayores profundidades en la zona central del cordón costero, y menores hacia sus bordes. Los mapas muestran una profundización del nivel freático entre enero y marzo. En enero, las áreas con profundidades mayores a 3 m son más restringidas, mientras que, en marzo, esta área ha aumentado significativamente. También se observa que las curvas de 2 m se desplazan hacia el centro del cordón medanoso.

Las variaciones de profundidad del nivel freático entre enero y marzo fueron medidas en 17 pozos, y oscilaron entre +8 y -35 cm. Quince pozos mostraron un descenso entre enero y marzo, uno no mostró variaciones y uno mostró un ascenso del nivel freático de 8 cm (ver Fig. 3c). De acuerdo a lo observado, los 112 mm de precipitaciones acumuladas y los excesos asociados (24,5 mm) no fueron suficientes para producir el ascenso de la capa freática entre mediciones en el ambiente de médanos. En otras zonas costeras como el Partido de La Costa, considerando mediciones de paso mensual, en términos generales si las precipitaciones acumuladas entre las fechas de relevamientos son inferiores a 60 mm, no se registra una elevación en los niveles freáticos (Carretero y Kruse, 2012). Es decir, que no se manifiesta una respuesta detectable entre un relevamiento y el siguiente si el total de las precipitaciones están por debajo de dicho valor. En Villa Gesell este parámetro todavía no ha sido determinado por encontrarse en la etapa inicial de las investigaciones.

Se observan diferencias en el comportamiento del nivel freático al analizar las variaciones de acuerdo al uso del suelo (ver Fig. 4). Los pozos ubicados en zona de bosque y médano presentan la misma variación promedio, sin embargo, en la primera se observa una menor dispersión de los datos. En la zona de médano se encuentra el único pozo que no mostró variaciones de nivel entre campañas. La presencia de valores negativos y relativamente uniformes en la zona de bosque es congruente con la ausencia de excesos que el balance hídrico arrojó para este tipo de cobertura. La zona urbana muestra una variación promedio más cercana a 0 que las anteriores, es decir, registra un menor descenso de niveles freáticos, e incluye al único freatímetro en el cual se identificó un aumento del nivel freático. Respecto de esto último, los excesos estimados para este tipo de cobertura (3,7 mm entre campañas) no serían suficientes para justificar un ascenso del nivel freático de 8 cm. Debe considerarse la posibilidad de una recarga artificial por actividad antrópica (riego, pérdidas en cañerías, etc.).

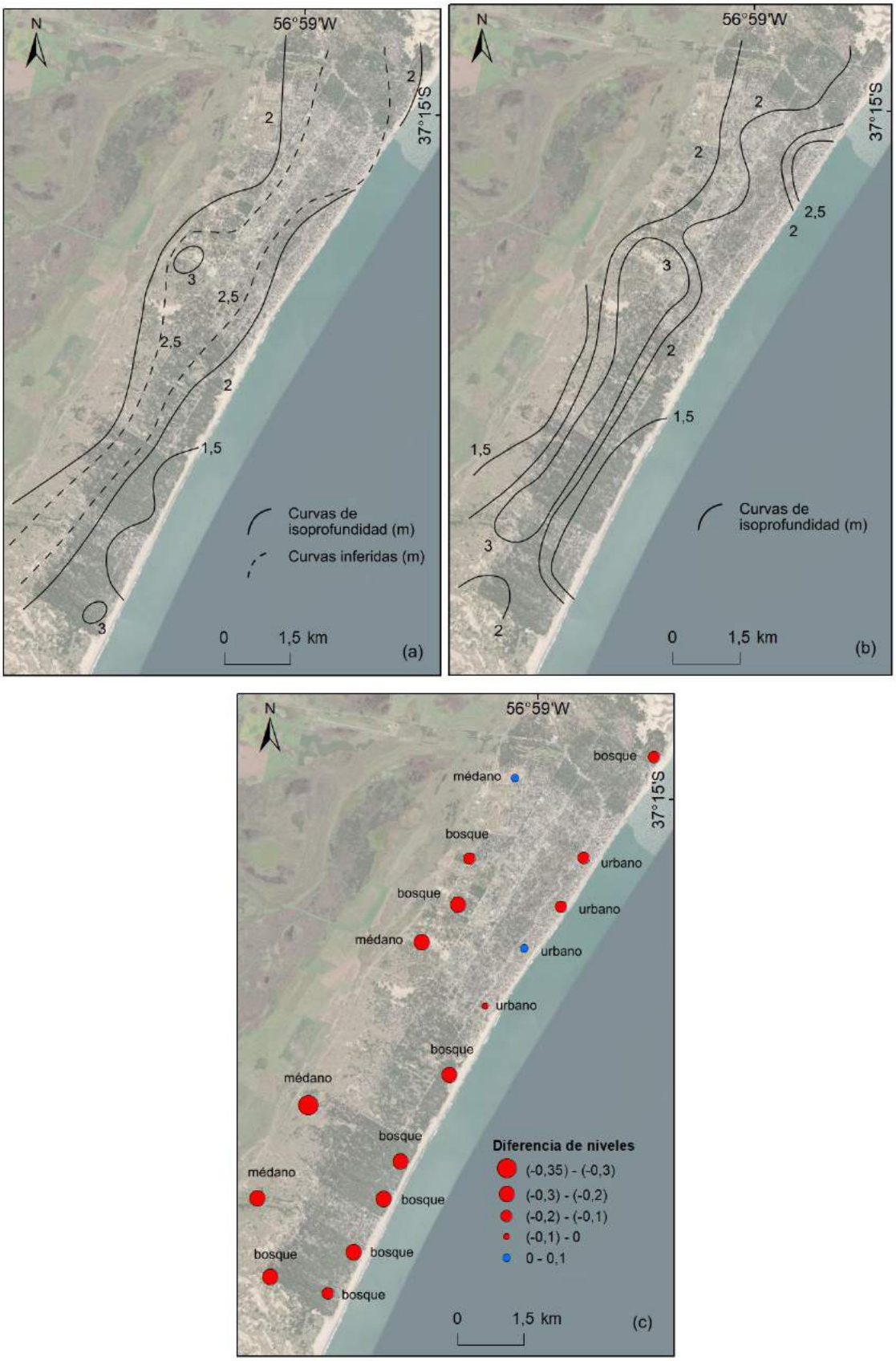


Figura 3. a. mapa de isoprofundidad del nivel freático en enero, **b.** en marzo, y **c.** diferencia de nivel entre enero y marzo.

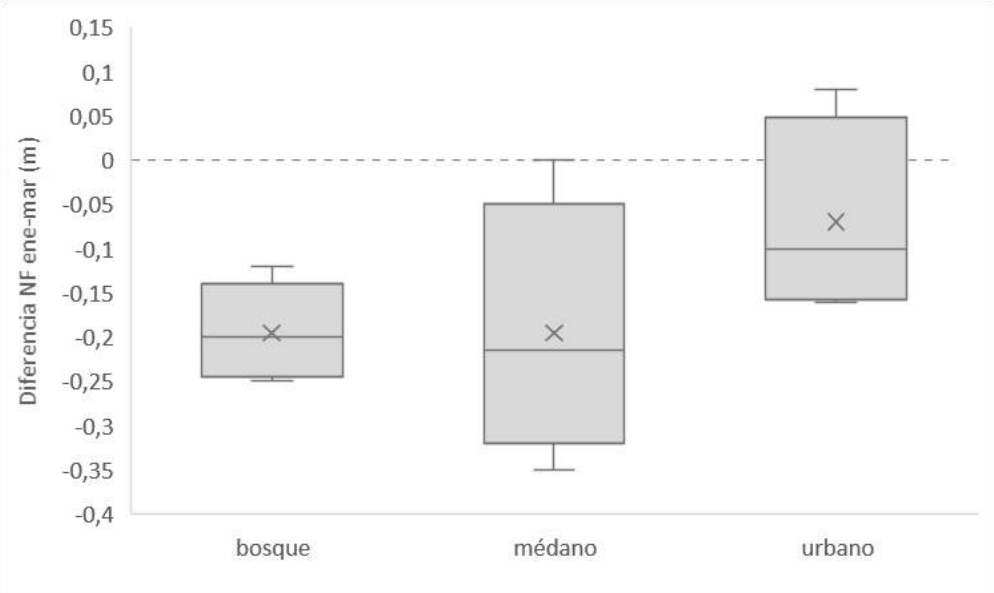


Figura 4. Diagramas boxplot de los datos de variación del nivel freático agrupadas según la cobertura del suelo.

Distribución de la conductividad eléctrica

Se obtuvieron valores de conductividad eléctrica entre 51 y 542 µS/cm (ver Fig. 5). El valor máximo de conductividad puede considerarse apto para consumo humano. Los valores de conductividad eléctrica obtenidos no muestran influencia de una posible intrusión salina, sin embargo, se trata de pozos someros. Hurtado et al, 1987 identificaron la posición de la interface agua dulce-agua salada mediante métodos geoeléctricos, descartando en aquel momento la presencia de procesos de intrusión salina en Villa Gesell. No obstante, han transcurrido más de tres décadas desde la realización de este trabajo. Si bien los resultados del presente estudio indican que el acuífero freático no presenta influencia de agua salada, para conocer las condiciones en las cuales se encuentra actualmente dicha interface, debería contarse con perforaciones profundas en zonas cercanas a la costa.

De acuerdo al uso del suelo, la conductividad eléctrica es marcadamente menor en la zona de médano respecto de las otras dos (ver Fig. 6). La zona urbana presenta el mayor promedio y menor desvío estándar. La zona forestal presenta un promedio semejante al de la zona urbana, y también el valor máximo de conductividad detectado. Por otro lado, presenta también el mayor desvío estándar de las tres zonas, por lo cual no es posible definir un control de la forestación sobre la conductividad eléctrica del agua freática.

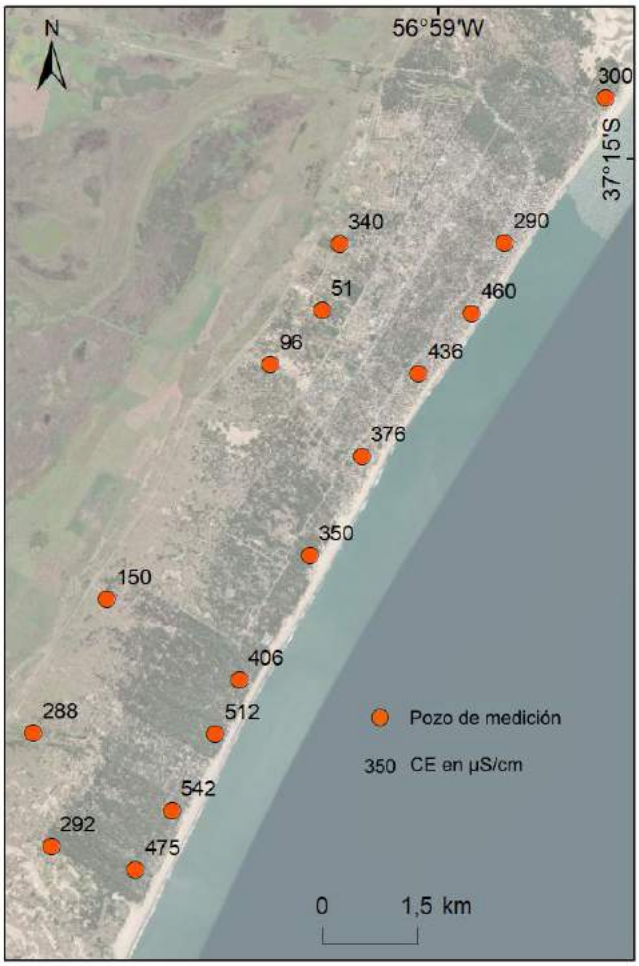


Figura 5. Conductividad eléctrica.

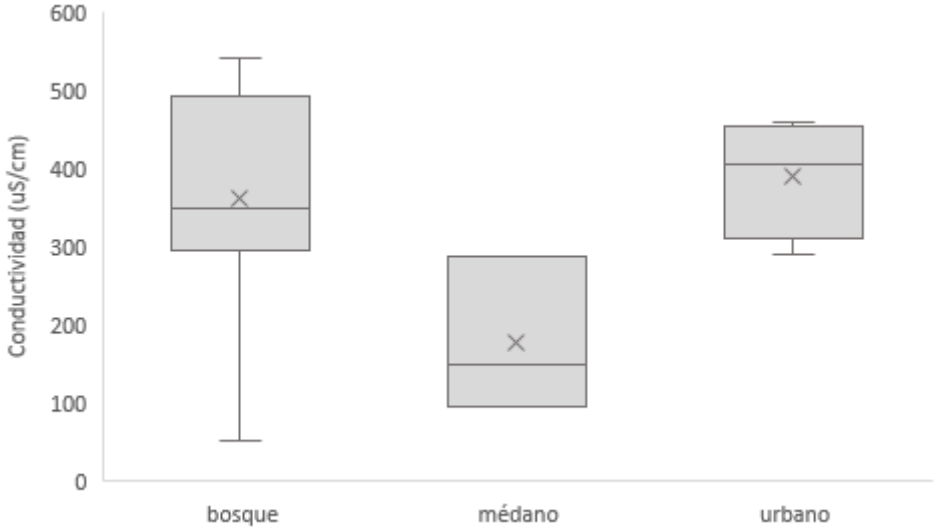


Figura 6. Diagramas boxplot de los datos de conductividad eléctrica agrupados según la cobertura del suelo.

CONCLUSIONES

Se realizó un trabajo básico para comenzar el estudio sistemático del acuífero freático en el Partido de Villa Gesell, como lo es la construcción de una red de monitoreo del agua subterránea mediante la perforación de freatímetros. Se instaló un total de 24 freatímetros de entre 3,5 y 5,5 metros de profundidad, distribuidos en los 48 km^2 del área de estudio.

A partir de la toma de datos de nivel freático en enero y marzo, se obtuvo un registro de las variaciones de nivel en cada pozo durante el verano. Los resultados muestran un claro descenso del nivel freático, dado que 15 de los 17 pozos medidos en ambas campañas presentaron variaciones de nivel negativas.

Los valores de conductividad eléctrica se encuentran dentro de un rango aceptable para el consumo humano. No se registró la presencia de agua salada en los primeros metros del acuífero freático, sin embargo, se reconoce la necesidad de contar con perforaciones profundas cercanas a la costa para descartar la posibilidad de un proceso de intrusión salina.

La cobertura del suelo condiciona el comportamiento de las variables estudiadas en el acuífero freático. Las zonas de bosque y médano presentan variaciones promedio de nivel freático similares, aunque en la primera, la dispersión de los datos es menor. La zona urbana presenta un menor descenso promedio, e incluye un pozo en el que se registró un aumento del nivel freático.

Respecto de la conductividad eléctrica, la zona urbana mostró valores significativamente mayores que la zona de médano. La cobertura de bosque mostró una gran dispersión de los datos, por lo que no es posible definir un control unívoco de este tipo de cobertura sobre este parámetro en los primeros metros del acuífero freático.

El presente trabajo constituye una primera aproximación al estudio del sistema acuífero costero en Villa Gesell. Si bien la instalación de freatímetros se vio interrumpida por la implementación del Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio en el mes de marzo de 2020, se proyecta la realización de más perforaciones, que aumentarán la densidad de datos de la red de monitoreo.

REFERENCIAS

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes and D., Smith, M. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements*). FAO Irrigation and Drainage. Paper No 56*, 300, (1998).

Bértola, G.R., Isla, F.I., Cortizo, L.C. y Turno Orellano, H.A. Modelo sedimentario de la barrera medanosa al norte de Villa Gesell (provincia de Buenos Aires) – de aplicación hidrogeológica. *Lat Am J Sedimentol Basin Anal*, 9 (2), 109-126, (2002).

Besteiro, S.I. *Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura pampeana*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, La Plata, 2014.

Bocanegra, E., Da Silva, G.C., and Custodio, E. State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeol J* 18, 261–267 (2010). https://doi.org/10.1007/s10040-009-0520-5

Carretero, S. *Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2011 http://sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLPTPG-0000002075&request=request

Carretero S. y Kruse E. Relationship between precipitation and water-table fluctuation in a coastal dune aquifer: northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. *Hydrogeol J* 20, 1613–1621 (2012) DOI: 10.1007/s10040-012-0890-y

Carretero, S., Braga, F., Kruse, E. and Tosi, L. Temporal analysis of the changes in the sand-dune barrier in the Buenos Aires Province, Argentina, and their relationship with the water resources. *Appl Geogr*, 54, 169-181, (2014).

Consejo Federal de Inversiones. *Evaluación del recurso hídrico subterráneo en la región costera atlántica bonaerense*, Buenos Aires, Consejo Federal de Inversiones, 1990.

Custodio, E. Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeol J* 18, 269–280 (2010).

Falasca S. and Forte Lay, J.A. *Actualización de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman–Monteith en la República Argentina*. Congreso de AADA, La Plata, Argentina, 2006.

Forte Lay, J.A., Aiello, J.L. and Kuba, J. *Software AGROAGUA v.5.0.,* Veternik, Serbia, 1995.

Gómez L., Carretero S., Kruse E. Caracterización hidrogeológica preliminar de la localidad de Mar del Tuyú (Provincia de Buenos Aires). *Anales de trabajos completos de XXVI CONAGUA, Eje H - Agua, sociedad, cultura y educación* 74 – 81 (2017a).

Gómez L., Carretero S., Vera F., and Kruse E. Cambios en la infiltración del médano costero asociado a variaciones en el uso del suelo (Mar del Tuyú, Partido de La Costa). *2°Jornadas Bonaerenses sobre Conservación de Ambientes y Patrimonio Costero*, 46-47 (2017b).

Hurtado, H., Meleguer E. y Werner, N. Prospección hidrogeológica por métodos geoeléctricos en el acuífero de Villa Gesell. Aplicación del programa CORTES. *Convenio INCYTH-Municipio de Villa Gesell*, Ezeiza. 31, 1987.

INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina), 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Disponible en https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-999-999-06-868-2010 (último acceso: 20/10/2020)

INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina), 2020a. Proyección por Departamento. Disponible en https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-24-119 (último acceso: 24/10/20).

INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina), 2020b. Turismo y Ocupación Hotelera 2020. Disponible en https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-13-56 (último acceso: 24/10/20).

Isla, F.I., Cortizo, L.C. and Schnack, E.J. Pleistocene and Holocene beaches and estuaries along the Southern Barrier of Buenos Aires. *Quat Sci Rev* 15, 8-9, 833-841 (1996).

Kruse, E., Carretero, S., Pousa, J. and Guaraglia, D. Critical problems for the fresh water supply to summer resorts on the eastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. *En Rossi, A.E. y Miranda, L.S. (Editores), Argentina: Environmental, Geographical and Cultural Issues*, Hauppauge, New York, USA, Nova Science Publishers, 105-120 (2012).

Marcomini, S.C. *Morfodinámica, sedimentología, geomorfología ambiental y sus alteraciones antropogénicas en costas de dunas del noreste de la provincia de Buenos Aires*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2002.

Rodrigues Capitulo, L. *Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Caso de estudio: Pinamar*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Argentina, 2015. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/42/browse?authority=30187&type=author

Rodrigues Capitulo, L., Carretero, S. and Kruse, E. Impact of afforestation on coastal aquifer recharge. Case study: eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environ Earth Sci*, 77 (74), (2018). https://doi.org/10.1007/s12665-018-7258-0

Satkunas, J. Geoscientific information and environmental management - case of Lithuania in European context. *33rd International Geological Congress. Abstract CD EME-02 Role of geoscience in governance for sustainable development and human security*. Oslo. Norway (2008).

Thornthwaite, C. and Mather, J. The water balance. *Climatol*, 8, 1–37, (1955).

Violante, R. y Parker, G. Estratigrafía y rasgos evolutivos del Pleistoceno medio a superior – Holoceno en la llanura costera al sur de Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires. *Rev Asoc Geol Argent* 47 (2), 215-228, (1992).

Violante, R., Parker, G. y Cavallotto, J. L. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la Bahía Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. *Rev Asoc Geol Argent*, 56 (1), 51-66, (2001).

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MIRANDA (ARGENTINA) A PARTIR DE DIFERENTES MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Sánchez Caro L.[a,b], Alfaro D.N.[c] y López L.[a,d]

[a]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*
[b]*Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[d]*Instituto de Recursos Minerales (INREMI), FCNyM - Universidad Nacional de La Plata, La Plata, BA, ARGENTINA*

e-mail: leonardo.sanchezcaro@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento de tres modelos digitales de elevación (MDE; base de datos SRTM, ASTER GDEM y MDEAr), para el análisis morfométrico de la cuenca del Río Miranda, La Rioja, Argentina. Para esto, los MDE originales, con una resolución espacial de 30 m, fueron remuestreados a un tamaño de píxel de 10, 90 y 120 m. Se generaron cuencas y redes de drenaje con áreas mínimas de aporte de 0,1 y 0,2 km^2. A modo de referencia, se digitalizó manualmente la red de drenaje a una escala de 1:10000. Se midieron y calcularon 26 parámetros referidos a la geometría de cuenca, a la red de drenaje y al relieve. Mediante digitalización manual, se obtuvo una red de sexto orden, con un total 1669 cursos. Para un área mínima de 0,1 km^2 todos los MDE resultaron en redes de sexto orden. Para un área mínima de 0,2 km^2, se obtuvieron redes de quinto o sexto orden, según el MDE y tamaño de píxel. En este sentido, SRTM y ASTER demostraron mayor consistencia en los resultados. La pendiente media de la cuenca se vio afectada por el tamaño de píxel, mientras que las curvas hipsométricas obtenidas para cada MDE fueron muy semejantes, independientemente del resmuestreo. Para todas las bases de datos, el remuestreo a resoluciones más gruesas aumentó considerablemente el error en la definición de la red de drenaje, mientras que el remuestreo a mayor resolución sólo significó una disminución significativa del error para el MDE SRTM. Se recomienda la utilización de los MDE ASTER de 30 m y SRTM remuestreado a 10 m para el análisis del drenaje en la zona de estudio. Para el análisis del relieve y la geometría de cuenca, no hay diferencias significativas entre los tres MDE originales.

Palabras Clave: Cuencas de Drenaje, Sistemas de Información Geográfica, Geomorfología.

INTRODUCCIÓN

El análisis morfométrico es una herramienta frecuentemente utilizada para abordar la hidrología y geomorfología de una zona. Desde finales del Siglo XX, los modelos digitales de elevación (MDE) han sido ampliamente utilizados en este tipo de estudios. El análisis morfométrico representa el primer paso del estudio geomorfológico cuantitativo de una cuenca hidrográfica (Das et al, 2016), y constituye la base para

evaluar controles estructurales y litológicos que puedan estar actuando en un paisaje (Ferraris, 2012).
Actualmente existen abundantes fuentes de datos de elevación de uso libre (Grohmann, 2015). La calidad de los datos de entrada condiciona los resultados obtenidos a través de los procedimientos implicados en un análisis morfométrico. Mayor resolución espacial de un MDE implica mayor precisión, pero conlleva también un mayor gasto computacional en su procesamiento (Grohmann, 2015). Numerosos autores han evaluado el efecto de la resolución de los MDE sobre diferentes parámetros morfométricos de una cuenca, analizados a distintas escalas mediante el remuestreo de los datos de elevación (Chen and Zhou, 2013; Chow and Hodgson, 2009; Gao, 1997; Mokarram and Hojati, 2017). Para el estudio geomorfológico y/o hidrológico de una zona, resulta de interés saber cuál de las fuentes de datos disponibles es la más apropiada, de acuerdo a características propias del área de estudio (cobertura del suelo, relieve, entre otros) y a los objetivos de la investigación (Das et al, 2016; Karabulut and Özdemir, 2019; Niyazi et al, 2019).
Los objetivos del presente trabajo fueron realizar una caracterización geomorfométrica preliminar de la Cuenca del Río Miranda, La Rioja, Argentina, evaluar el desempeño de MDE de distintas fuentes para este fin, y determinar la influencia del remuestreo de los MDE sobre los parámetros morfométricos básicos del análisis.

Área de estudio

La Cuenca del Río Miranda (ver Fig. 1) se ubica en el centro de la provincia de La Rioja, sector centro-occidental argentino, entre los 29° 02’ 37’’ y 29° 27’ 01’’ de latitud sur, y entre los 67° 52’ 16’’ y 67° 37’ 40’’ de longitud oeste. Presenta una orientación NNO-SSE y su punto de desembocadura se localiza a aproximadamente 4 km al SO de la cuidad de Sañogasta, departamento de Chilecito. La cuenca se desarrolla sobre el sector centro-sur de las sierras de Famatina y limita hacia el sur con las sierras de Sañogasta, con una elevación máxima de 5749 msnm y una elevación mínima de 1294 msnm. Con cabecera en el Cerro General Belgrano, su superficie engloba diversos rasgos orográficos de pequeña escala tales como el Cerro Morado, el Cerro Potrerillos, el Cerro Alto Blanco, entre otros.
Las sierras de Famatina pertenecen a la unidad morfoestructural del Sistema de Famatina, el cual tuvo su evolución tectono-metamórfica y magmática durante el ciclo Famatiniano (465 a 365 Ma.). Los afloramientos de este Sistema se extienden a lo largo de una faja norte-sur entre los 27º 25´ a 30º 20´ de latitud sur, con 350 km de largo y 60 km de ancho, rodeada hacia el este y oeste por las Sierras Pampeanas (Duran et al, 1987). Las sierras de Famatina constituyen un sector geológicamente complejo, con la presencia de corrimientos de alto ángulo controlados por la estructuración del basamento. El levantamiento de estas sierras es atribuido a fallas inversas relacionadas con la Orogenia Andina durante el Triásico Tardío (Candiani et al, 2011).
Desde un punto de vista litoestratigráfico, El Sistema de Famatina está conformado por rocas metamórficas de bajo grado y plutonitas del Precámbrico superior-Paleozoico inferior sobre las cuales apoyan sedimentitas marinas y continentales, y vulcanitas paleozoicas, mezosoicas y cenozoicas (Miró, 1999). La mayor parte de la Cuenca del Río Miranda muestra afloramientos del Granito Ñuñorco (Turner, 1962), el cual constituye el basamento en este sector. Se reconocen también las sedimentitas continentales pérmicas de la Fm Patquía, así como depósitos del Cenozoico superior relacionados al piedemonte y sedimentos modernos del Río Miranda.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

METODOLOGÍA

Se descargaron tres MDE disponibles online en forma gratuita, desde las páginas web de sus organismos proveedores correspondientes. De la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, https://earthexplorer.usgs.gov/) se obtuvo el MDE correspondiente a la misión espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), llevada cabo en el año 2000 por la la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en cooperación con el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y el National Geospatial Intelligence Agency (NGA)(Farr et al., 2007). Del centro de búsqueda Earth Data Search (https://search.earthdata.nasa.gov/search) de la NASA, se obtuvo el MDE Global Digital Elevation Model, correspondiente al sensor de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer del satélite Terra (ASTER). De la página web del Insituto Geográfico Nacional (IGN) de la Argentina (https://www.ign.gob.ar/) se obtuvo el MDE-Ar v2.0, generado en el IGN a partir de una combinación de datos de las misiones satelitales SRTM y ALOS. Su referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16).

Los tres MDE presentan una resolución espacial de 1 arco-segundo (aprox. 30 m en el ecuador), y un Sistema de Coordenadas Geográficas WGS84. Para el procesamiento de los MDE, se los integró al sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS 10.2.2. Los MDE originales fueron proyectados desde el sistema de coordenadas geográficas original, al sistema de coordenadas proyectadas Universal Transversal de Mercator faja 19 sur, con datum WGS84.
Cada MDE fue remuestreado para obtener grillas de menor resolución (90 y 120 m de píxel) y de mayor resolución (10 m de píxel) (ver Fig. 2). En todos los casos, se utilizó un algoritmo bilineal (herramienta Resample, en el módulo Data Management Tools de ArcToolBox) para interpolar los datos reales, y generar las correspondientes matrices derivadas.

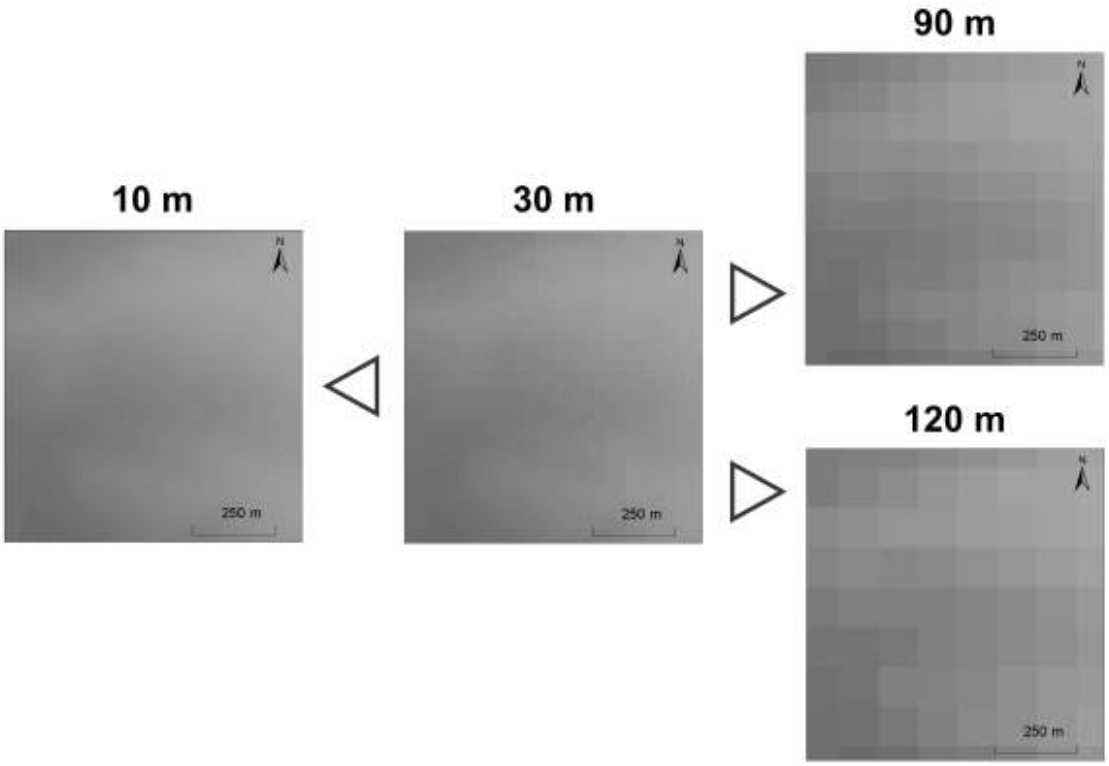


Figura 2. MDE de mayor y menor tamaño de celda obtenidos a partir del MDE original con píxel de 30 m (en este caso, corresponde al MDE SRTM).

Se delimitaron las cuencas y se generaron las redes de drenaje mediante el paquete de herramientas Hydrology (ArcGis 10.2.2). La digitalización automática de una red de drenaje implica una serie de pasos sucesivos, cada uno de los cuales resulta en la generación de una nueva capa ráster. El proceso se inicia con el relleno de las depresiones e imperfecciones de los datos originales. Sobre el MDE corregido, se calcula la dirección de flujo correspondiente a cada píxel; en este caso, se implementó el modelo D8 (O'Callaghan and Mark, 1984) de acuerdo a Jenson and Domingue, 1988. A partir de esto, se calcula la acumulación de flujo para cada píxel, y se extrae la red de drenaje mediante la aplicación de un área crítica de aporte. Si bien ha habido intentos de generar un criterio cuantitativo a la definición de esta área crítica (*e.g.* Tarboton et al, 1991), típicamente su definición sigue siendo subjetiva. Dobos and Daroussin, 2005,

plantean que, para un MDE con tamaño de píxel de 100 m, un área crítica de 1 km^2 resulta en una densidad de drenaje realista. En este caso, y con la intención de obtener el mayor detalle posible de acuerdo a las limitaciones propias de los sets de datos de elevación, se utilizaron 2 áreas críticas, 0,1 km^2 y 0,2 km^2.
Se calcularon 24 parámetros morfométricos referidos a la geometría de la cuenca, al relieve, y a la red y textura de drenaje (ver Tabla I). Se generó también la curva hipsométrica correspondiente a cada MDE.

Tabla I. Parámetros morfométricos medidos y calculados.

Parámetro	Símbolo	Método
Red de drenaje		
Orden	u	*Strahler (1964)*
Número de cursos	Nu	*Nu = N1 + N2 + … + Nn*
Longitud total de cursos (km)	Lu	*Lu = L1 + L2 + … + Ln*
Relación de bifurcación	Rb	*Rb = Nu/Nu+1*
Promedio ponderado de relación de bifurcación	RbP	$RbP = \frac{\sum_{i=1}^{n} Rb_i (N_i + N_{i+1})}{\sum_{i=1}^{n} (N_i + N_{i+1})}$
Longitud del canal principal	LCP	*Análisis en SIG*
Geometría de cuenca		
Área (km2)	Ac	*Análisis en SIG*
Longitud (km)	Lc	*Análisis en SIG*
Perímetro (km)	Pc	*Análisis en SIG*
Ancho (km)	Wc	*Wc = Ac/Lc*
Coeficiente de circularidad	Kci	$Kci = 4\pi Ac/Pc^2$
Coeficiente de elongación	Ke	$Ke = 2\sqrt{(Ac/\pi)}/Lc$
Coeficiente de textura	Kt	*Kt = Nu/Pc*
Factor de forma de Horton	Kf	$Kf = Ac/Lc^2$
Coeficiente de compacidad	Kc	$Kc = Pc/2\sqrt{(\pi Ac)}$
Textura de drenaje		
Frecuencia de cursos	Fr	*Fr = Nu/Ac*
Densidad de drenaje	Dd	*Dd = Lu/Ac*
Características del relieve		
Elevación máxima	H_{MAX}	*Análisis en SIG*
Elevación mínima	H_{MIN}	*Análisis en SIG*
Relieve	Rf	$Rf = H_{MAX} - H_{MIN}$
Elevación media	Hm	*Análisis en SIG*
Coeficiente de relieve	Kr	*Kr = Rf*100/Lc*
Pendiente media de cuenca	Sm	*Análisis en SIG*
Número de rugosidad	Nr	*Nr = Rf*Dd*

Para evaluar y analizar comparativamente los resultados, se utilizaron los valores en bruto de cada parámetro para los diferentes MDE, y valores promedio y de variación porcentual para cada parámetro. La variación porcentual se define como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, sobre el valor máximo de cada parámetro.

Se realizó la digitalización manual de la red de drenaje, a una escala de 1:10000, con el objetivo de contar con una referencia supervisada contra la cual contrastar las redes obtenidas automáticamente.
Se evaluó el grado de error de las redes automatizadas respecto de la digitalizada manualmente, en base al Nu obtenido para cada una de ellas. La red generada con un área crítica de 0,1 km^2 presentó un error menor, por lo que se definió como patrón para evaluar el desempeño de los MDE. Esto se realizó sobre la base del número de cursos de orden 1, 2, 3 y 4 respecto de la red manual. Dado que ambas redes presentaron dos cursos de quinto orden y uno de sexto orden, estos órdenes fueron excluidos del análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 12 conjuntos de cuencas de drenaje con sus respectivas redes (ver ejemplo en Fig. 3) y parámetros morfométricos. Se muestran a continuación los resultados obtenidos para los parámetros de geometría de cuenca, relieve y red de drenaje (se incluye dentro de estos últimos a los referidos a la textura de drenaje).

Geometría de cuenca

No todos los parámetros son afectados de igual manera por el remuestreo (ver Tabla II). Una mayor variación porcentual se interpreta como una mayor influencia del remuestreo de los MDE sobre el valor de un parámetro morfométrico dado.
Se obtuvo un Ac promedio de 415 km^2, con una variación porcentual prácticamente nula. El Pc promedio fue de 134 km, con una mayor variación que el área. Los MDE de menor tamaño de píxel presentan los mayores valores de Pc, dado que la mayor resolución aumenta la distancia lineal que recorre el borde de la cuenca, mientras que el área prácticamente no se ve afectada. Los valores bajos de Kci, Ke y Kf son congruentes entre sí e indican una cuenca alargada; sin embargo, Kci presenta una variación porcentual mucho mayor a la de Ke y Kf, debido a que su cálculo involucra el Pc. Esto ejemplifica la importancia de caracterizar la geometría de una cuenca mediante la integración de varios parámetros. Kc también presenta cierta variación debida al Pc, aunque en todos los casos se mantiene en el rango de valores asignado a una cuenca oval oblonga a rectangular-oblonga (Clase III, Campos, 1992). Si bien el remuestreo de los MDE influye sobre los resultados obtenidos dentro de cada set de datos, los MDE SRTM, ASTER y MDE Ar no muestran diferencias significativas entre sí respecto de la geometría de cuenca.

Tabla II. Parámetros morfométricos referidos a la geometría de cuenca.

Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %
Ac (km2)	415	413	418	1,20%
Lc (km)	48	48	49	2,85%
Pc (km)	134	127	143	11,19%
Wc (km)	8,6	8,5	8,7	3,08%
Kci	0,293	0,254	0,323	21,32%
Ke	0,5	0,5	0,5	2,96%
Kt	8,8	8,1	9,5	15,08%
Kf	0,2	0,2	0,2	5,84%
Kc	1,8	1,7	2,0	11,30%

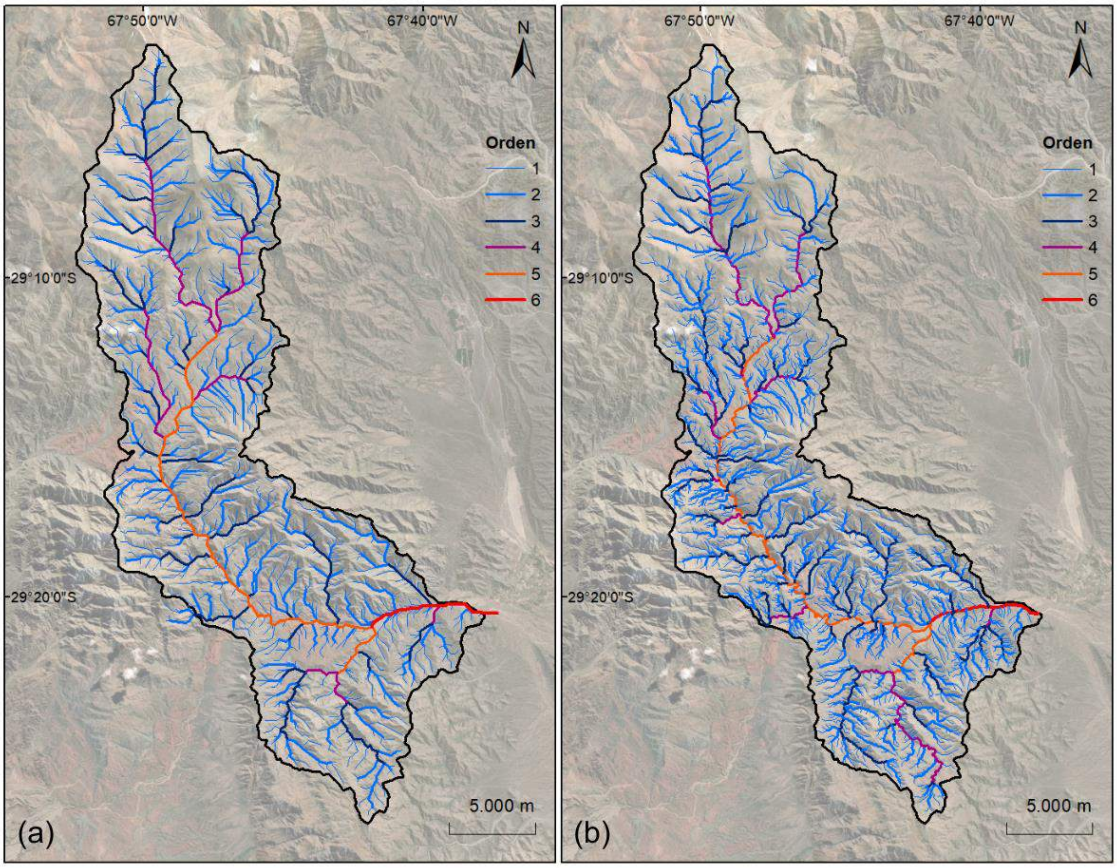


Figura 3. Cuenca y red de drenaje jerarquizada (a modo de ejemplo, se muestran los resultados correspondientes al MDE SRTM con tamaño de píxel de 10 m), obtenidas mediante la aplicación de herramientas de SIG. **b.** Red de drenaje digitalizada manualmente.

Relieve

Los parámetros de relieve son particularmente consistentes entre distintos MDE con y sin remuestreo (ver Tabla III), con excepción de Sm, que puede tomarse como un indicador general de las pendientes. El aumento del tamaño de píxel tiende a suavizar las pendientes, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar estudios regionales con MDE de menor resolución espacial.

La curva hipsométrica de una cuenca otorga una aproximación al estado evolutivo de la misma (Strahler 1952). La Fig. 4 muestra la curva hipsométrica de la Cuenca del Río Miranda, que resultó uniforme a través de los diferentes MDE. De acuerdo a la comparación con curvas teóricas que simbolizan estadios de juventud, madurez y senectud de la cuenca, la Cuenca del Río Miranda se encontraría en un estado intermedio entre madurez y senectud.

Tabla III. Parámetros morfométricos referidos al relieve

Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %
Hmax (msnm)	5741	5730	5749	0,33%
Hmin (msnm)	1285	1266	1294	2,16%
Rf (m)	4456	4441	4471	0,67%

Hm (msnm)	2973	2967	2977	0,34%
Kr	0,092	0,091	0,093	2,42%
Sm (grados)	23	20	25	19,58%
Nr	9,01	8,75	9,14	4,31%

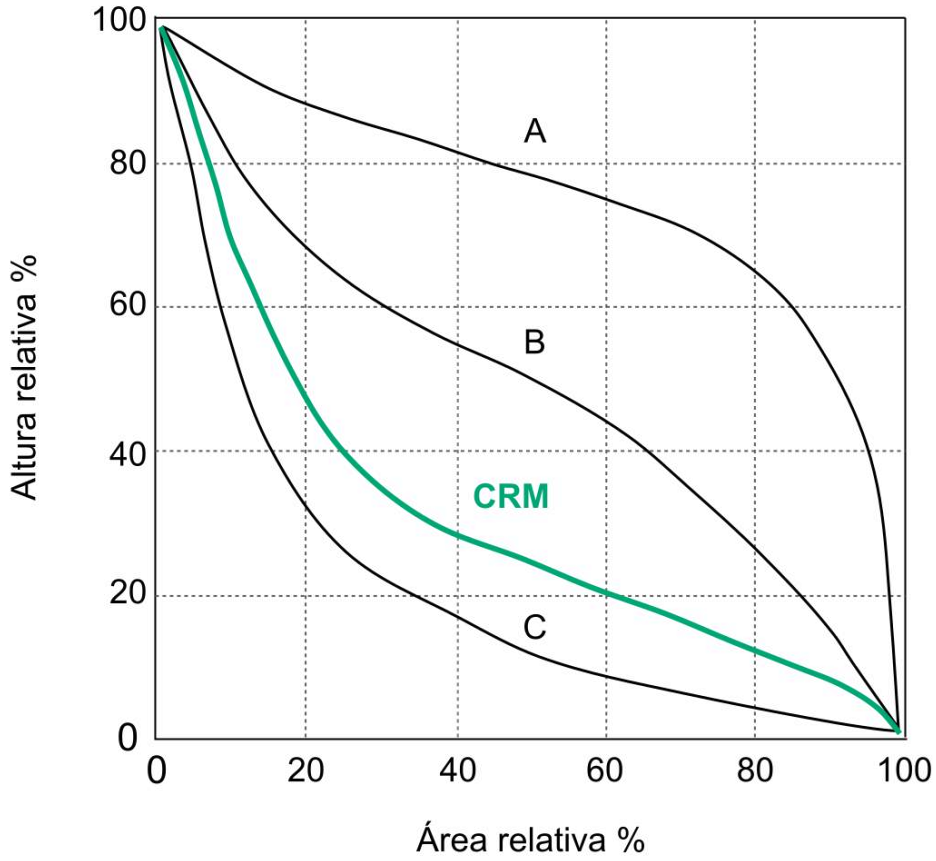


Figura 4. Curva hipsométrica de la Cuenca del Río Miranda (CRM) y curvas teóricas que representan estadios de juventud (A), madurez (B) y senectud (C) de una cuenca hidrográfica.

Red de drenaje

Al evaluar los resultados referidos a la red de drenaje, debe tenerse en cuenta al área crítica como una variable adicional que condiciona el rendimiento de los MDE. La red digitalizada manualmente resultó de sexto orden, contiene 1669 cursos que suman una longitud total de 1096 km, y presentó un RbP de 4,34. Se usó como referencia para evaluar el desempeño de los distintos MDE, así como del remuestreo y de la aplicación de distintas áreas críticas.

Para el área crítica de 0,1 km^2, todas las redes automáticas fueron de sexto orden. Con un área crítica de 0,2 km^2, el remuestreo condiciona el orden de la red, que resultó de orden 5 o 6, según el caso. La fuente de datos con peor desempeño para un área crítica de 0,2 km^2 fue MDE Ar, donde sólo la grilla remuestreada a 90 m resultó en un orden 6. En el caso de SRTM y ASTER, se obtuvieron dos redes de orden 5 y dos de orden 6.

La Fig. 5 muestra el error porcentual en Nu de cada MDE respecto de la red manual para ambas áreas de aporte. Resulta evidente que el área crítica de 0,1 km^2 presenta

errores significativamente menores que la de 0,2 km^2. Esto, sumado a la inconsistencia de la última respecto del orden de cuenca, permite definir 0,1 km^2 como el área mínima de aporte que mejor se representa el paisaje real.

Tabla IV. Parámetros morfométricos referidos al drenaje

	Área límite = 0,1 km^2				Área límite = 0,2 km^2			
Parámetro	**Promedio**	**Mínimo**	**Máximo**	**Variación %**	**Promedio**	**Mínimo**	**Máximo**	**Variación %**
Nu	1184	1031	1309	21,24%	610	566	661	14,37%
N1	912	807	1013	20,34%	478	444	509	12,77%
N2	208	172	235	26,81%	105	95	118	19,49%
N3	49	41	58	29,31%	22	18	26	30,77%
N4	8	7	12	41,67%	4	3	6	50,00%
N5	2	2	2	0,00%	1	1	2	50,00%
N6	1	1	1	0,00%	1	1	1	0,00%
Lu (km)	840	816	859	5,01%	627	607	647	6,20%
Rb1-2	4	4	5	14,85%	5	4	5	11,83%
Rb2-3	4	4	4	12,21%	5	4	5	19,47%
Rb3-4	6	5	7	30,91%	5	4	7	46,00%
Rb4-5	4	4	6	41,67%	3	2	5	60,00%
Rb5-6	2	2	2	0,00%	2	2	2	0,00%
RbP	4	4	5	10,88%	5	4	5	9,04%
Fr	3	2	3	21,43%	1	1	2	14,58%
Dd	2	2	2	4,32%	2	1	2	5,77%

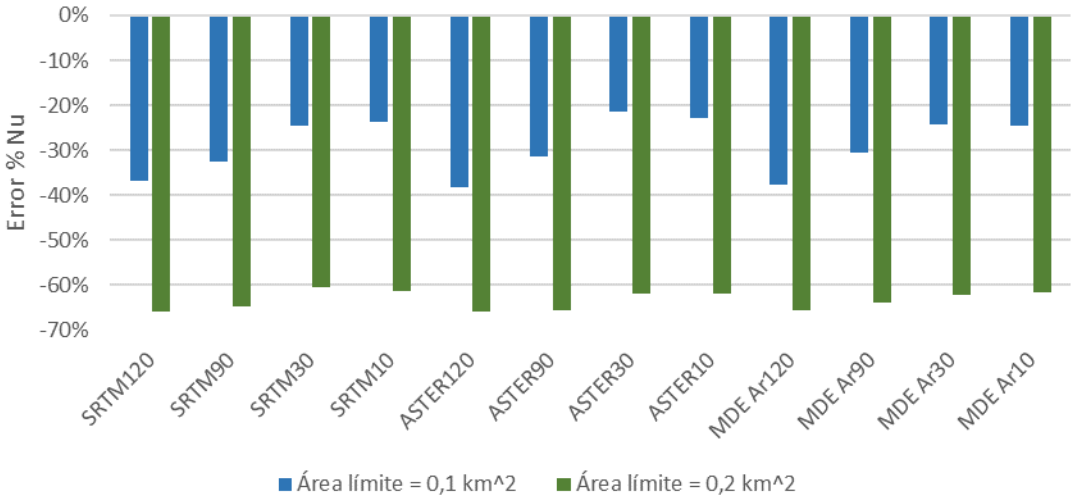


Figura 5. Error porcentual en el número total de ríos de cada MDE, para ambas áreas críticas, respecto de la red digitalizada manualmente.

Para identificar las diferencias de rendimiento entre los MDE, se utilizó el error promedio de número de cursos de cada orden (Nn), obtenidos con un área crítica de 0,1 km^2, respecto de la red manual (ver Fig. 6). En todos los casos se obtuvo un curso de

sexto orden y dos cursos de quinto orden, por lo que ambos órdenes fueron excluidos del análisis. Los MDE SRTM de 10 m y ASTER de 30 m de tamaño de píxel son los que presentaron menor error promedio. Por otro lado, el MDE ASTER de 30 m es el único caso que presentó un desvío positivo, y menor error para cada Nn que el obtenido por remuestreo del MDE a 10 m de resolución.

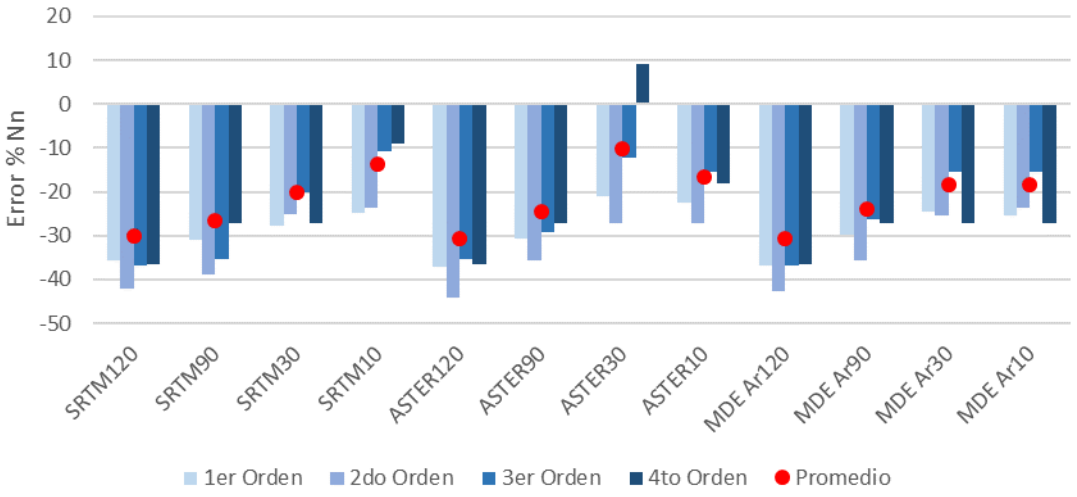


Figura 6. Error porcentual de los cursos de orden 1 a 4 y error porcentual promedio de cada MDE, para un área crítica de 0,1 km^2, respecto de la red manual.

CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Miranda, Provincia de La Rioja, Argentina. Se obtuvo un área de 415 km^2 y un perímetro de 134 km, con 48 km de largo y 8,6 km de ancho. La cuenca presenta una forma alargada y es de sexto orden.

El perímetro de la cuenca se ve afectado por el remuestreo de los MDE, lo cual conlleva variaciones en el cálculo del coeficiente de circularidad. Por esto, se recomienda integrar varios índices en la caracterización geométrica de una cuenca, especialmente en trabajos regionales a partir de datos de elevación de baja resolución espacial. De igual manera, el aumento del tamaño de píxel suaviza las pendientes del terreno, por lo que la pendiente media de la cuenca disminuye proporcionalmente a la resolución espacial del MDE.

Se verificó la importancia de definir un área crítica adecuada para la extracción de la red de drenaje a partir de los datos de elevación. El área crítica de 0,1 km^2 arrojó los mejores resultados, dado que se ajustó con menor error a la red de drenaje obtenida mediante el mapeo manual. Dentro de las redes obtenidas con esta área de aporte, las correspondientes a SRTM de 10 m y ASTER de 30 m presentaron el menor error porcentual promedio en el número de cursos respecto de la red manual, por lo que estos sets de datos pueden considerarse los más adecuados para la extracción de redes de drenaje en esta zona. Cabe mencionar que en el caso de SRTM, el remuestreo a menor tamaño de píxel disminuyó el error en el cálculo de la red, mientras que para los datos ASTER, los mejores resultados fueron obtenidos a partir del MDE de 30 m original.

Los resultados de este trabajo constituyen la base para futuros estudios geomorfométricos de la región, en los cuales podrán abordarse aspectos como el control

litológico y/o tectónico sobre el desarrollo de la red de drenaje, así como la aplicación de criterios geomorfológicos a la hidrología de la cuenca.

REFERENCIAS

Candiani J.C., Astini, R., Dávila, F., Collo G., Ezpeleta, M., Alasino, P., Dahlquist, J. y Carrizo, R. *Hojas geológicas 2969-18, Famatina y 2969-24, Sañogasta, 1:100.000*, Boletín 379, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, 2011.

Campos A., D. F. *Procesos del ciclo hidrológico*, UASLP, San Luis Potosí, México, 1992.

Chen, Y. and Zhou, Q. A scale-adaptive DEM for multi-scale terrain analysis, *Int J Geogr Inf Sci*, 27 (7), 1329-1348, (2013). DOI:10.1080/13658816.2012.739690

Chow T.E., and Hodgson, M.E. Effects of lidar post-spacing and DEM resolution to mean slope estimation, *Int J Geogr Inf Sci*, 23 (10), 1277-1295, (2009) DOI: 10.1080/13658810802344127

Das, S., Patel, P.P. and Sengupta, S. Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas. *SpringerPlus* 5, 1544 (2016). https://doi.org/10.1186/s40064-016-3207-0

Dobos E., and Daroussin, J.. *The derivation of the Potential Drainage Density Index (PDD) In. Dobos et al. 2005.An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1:1 and 1:5 million scales*. EUR 21571 EN, Office of Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2005.

Durand, F.R., Toselli, A.J. y Aceñolaza, F.G. Las estructuras de la Quebrada de Miranda y sus relaciones regionales, sistema de Famatina, provincia de La Rioja, Argentina. *Rev Geol de Chile*, 31, 21-29 (1987).

Farr, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission, *Geophys*, 45 (RG2004), 33 (2007). doi: 10.1029/2005RG000183.

Ferraris, F., Firpo, M., Pazzaglia, F.J. DEM analyses and morphotectonic interpretation: The Plio Quaternary evolution of the eastern Ligurian Alps Italy. *Geomorphology* 149–150, 27–40 (2012).

Gao, J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *Int J Geogr Inf Sci*, 11 (2), 199-212 (1997).

Grohmann, C.H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Comput & Geosci*, 77, 111-117, (2015). DOI:10.1016/j.cageo.2015.02.003

Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geol Soc Am Bull*, 56, 275-370 (1945).

Jenson, S. and Domingue, J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 54, 1593-1600 (1988).

Karabulut, M.S. and Özdemir, H. Comparison of basin morphometry analyses derived from different DEMs on two drainage basins in Turkey. *Environ Earth Sci* 78, 574 (2019). https://doi.org/10.1007/s12665-019-8585-5

Miró, R.C. *El Basamento Precámbrico-Paleozoico inferior de las Sierras Pampeanas, Famatina, Cordillera Oriental y Puna.* Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, 1999.

Mokarram, M. and Hojati, M. Morphometric analysis of stream as one of resources for agricultural lands irrigation using high spatial resolution of digital elevation model (DEM) *Comput Electron Agr*, 142, 190–200 (2017).

Niyazi, B., Zaidi, S. and Masoud, M. Comparative Study of Different Types of Digital Elevation Models on the Basis of Drainage Morphometric Parameters (Case Study of Wadi Fatimah Basin, KSA). *Earth Syst Environ* 3, 539–550 (2019). https://doi.org/10.1007/s41748-019-00111-2

O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Comput Vis Graph Image Process*, 28, 328-344 (1984). http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0

Strahler, A. N. Hypsometric (area- altitude) analisys of erosional topography. *Geol Soc Am Bull*, 63, 1117-1142 (1952).

Strahler, A.N. *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*, Section 4-II of Handbooks of Applied Hydrology, Mc Graw-Hill Book Co, New York, USA, 1964.

Tarboton, D.G., Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol Process*, 5, 81-100 (1991). doi:10.1002/hyp.3360050107

Turner, J.C. Estratigrafía del tramo medio de la sierra de Velasco y región oeste (La Rioja). *Bol Acad Nac Ci*, 42, 77-126, (1962).

DISTRIBUCIÓN DE DOMOS CUATERNARIOS EN LA ZONA VOLCÁNICA CENTRAL (ZVC), NORTE DE CHILE (18.07° – 27.12ºS)

Scheinost A. [a, b], Ureta G. [a, c], Aguilera F. [a ,c ,d] y Torres I.[a]

[a] *Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[b] *Universidad Católica del Norte, Programa de Doctorado en Ciencias Mención Geología, Antofagasta, CHILE*
[c] *Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, CHILE*
[d] *Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, CHILE*

e-mail:asc021@ucn.cl

RESUMEN

Este estudio tiene por enfoque determinar la distribución geográfica y composicional de eventos monogenético tipo domo en la ZVC del norte de Chile. Para esto se realizó una recopilación de 48 dataciones absolutas desde la literatura correspondientes a 38 domos Cuaternarios. Estos datos fueron compilados en el software Microsoft Access© y se evaluó su distribución por medio de análisis multivariable de tipo Partitioning Clústering (K-Means) con el software Real Statistics. Los resultados identifican 3 clústers geográficos. El primer clúster se ubica entre los 18.07°-19.97ºS e incorpora 11 domos, 7 de composición andesítica y 3 dacítica. El segundo clúster ubicado entre los 21.27°-23.49ºS, correspondiendo a 18 domos, 15 de composición dacítica, 2 andesítica, y 1 riolítica. Finalmente, el último clúster abarca desde los 26.94°-27.12ºS, presentando 9 domos, 6 de composición dacítica y 3 riolítica. Los resultados permiten inferir que la mayor concentración de domos andesíticos se ubica en el clúster 1, los daciticos en el clúster 2, y los riolíticos en el clúster 3. Esto indicaría una distribución composicional norte-sur marcada, que estaría asociada a la temporalidad de eventos o sub-clústeres, siendo observado en el clúster 1 donde los eventos andesíticos se agrupan en torno a los 0.164±0.028 Ma, mientras que los dacíticos a los 0.559±0.064 Ma.

Palabras Clave: Andes Centrales, Volcanismo monogenético, Volcanismo efusivo, Clústering.

1. INTRODUCCIÓN

El volcanismo Cuaternario en la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes es producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, donde los centros eruptivos se distribuyen en una franja de orientación norte-sur (Stern, 2004). El norte de Chile presenta gran número de centros volcánicos, tanto estratovolcanes como volcanes monogenéticos. Estos últimos están principalmente asociados a estratovolcanes, sin embargo, también se presentan de forma aislada. Estos eventos monogenéticos se caracterizan por ser de corta duración, y con volúmenes relativamente bajos (<1 km^3)(Nemeth et al., 2015). En la literatura se reconocen cinco tipos de eventos monogenéticos principales, siendo los eventos de tipo domo el foco de este estudio. Los domos se caracterizan por estar compuestos de lavas viscosas y rocas acumuladas alrededor del centro de emisión, se forman a medida que el magma se enfría y se desgasifica

relativamente rápido después de entrar en erupción en superficie (Calder et al., 2015). Los domos pueden formarse con una relativa rapidez, desde días hasta semanas, con episodios eruptivos que pueden prolongarse años a décadas (Barmin et al., 2002; Voight et al., 1999). La composición de los domos posee una amplia gama, desde basaltos (e.g. erupción de Semeru, 1946) hasta riolítica (e.g. lava domo Chaitén, 2010), aunque la mayoría son de composición intermedia (andesítica y dacitica) (Fink et al., 1995).

2. MÉTODOLOGIA

2.1 Recopilación base de datos

A partir de la revisión de artículos científicos asociados a la ZVC entre los 17ºS - 28ºS, y restringiendo el rango de edad al Cuaternario (<2.58 Ma) se identificaron 48 dataciones radiométricas asociadas a 38 centros monogenéticos de tipo domo (ver Fig. 1), composicionalmente caracterizados entre andesitas, dacitas y riolitas. Esta información se almacenó en el software Microsoft Access© para poder estandarizar los campos (composición, latitud, longitud, edad y error asociado) antes de ser exportados para ser trabajados en análisis multivariable.



Figura 1. Mapa de domos Cuaternarios recopilados.

2.2 Análisis multivariable

La distribución y composición de domos en la ZVC ha sido discutido en muchas publicaciones (e.g. de Silva et al., 1994; Gardeweg et al., 2000; Giles 2009; Lahsen and Munizaga 1979; Schmitt 2001; Walker 1991; Wörner et al., 1988, 2000). Sin embargo, estas publicaciones se centran en áreas definidas y utilizan datos de composición (e.g. elementos presentes) en diagramas geoquímicos típicos para caracterizar y comparar las composiciones de los domos. En este estudio nos centramos en caracterizar los datos a través de estadística multivariable para analizar a escala del orógeno andino central.

Para verificar la calidad de los datos compilados en la base de datos, se excluyeron del análisis las muestras con altos errores mediante análisis exploratorio de dato (tipo *boxplots*) en un primer paso antes de continuar el análisis estadístico. Después de este filtro se obtuvo un conjunto de datos con un total de 39 muestras con valores fiables.

Para calcular las agrupaciones de los datos se utiliza *K-means clustering* (MacQueen, 1967), donde el número *K* lo determina el analista antes de ejecutar el algoritmo. Para obtener el valor "*K*" más propicio se utiliza *hierarchical clustering*, a través del método de los dendrogramas. Un dendrograma es un tipo de representación gráfica en forma de árbol que organiza y agrupa los datos en subcategorías según su similitud. Esto se realizó mediante el software *Expression Heat Map,* obteniendo el número de clústers adecuado para procesar los datos en Real Statistics. El algoritmo del software trabaja de forma iterativa y minimiza la variación dentro del grupo, estableciendo centroides y calculando la distancia de todas las muestras a estos centroides por medio del cuadrado de la distancia euclidiana como medida de distancia (más información del procedimiento se puede encontrar en James et al., 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis tipo *K-means clustering* se presentan en las Fig. 1 y 2. A partir de los datos de distribución geográfica se obtuvieron 3 clústers (ver Fig. 2) de datos con centroides en; 1) 18.4968073ºS – 69.1069394ºW; 2) 22.3389508ºS – 67.9728892ºW; 3) 27.0611077ºS – 68.6867994ºW. El primer clúster (C1) contiene 11 domos, que van desde el Quenoavinto (18.066ºS -69.220ºW) a Porquesa (19.983ºS – 68.767ºW). El segundo clúster(C2) contiene 18 domos, que abarca desde Ingenio (21.266ºS – 68.217ºW) a Negro de Barriales (23.491ºS – 67.762ºW). El tercer clúster (C3) -el más pequeño- presenta 9 domos, desde Los Colorados (27.031ºS – 68.909ºW) a El Indio (27.112ºS – 68.836ºW).

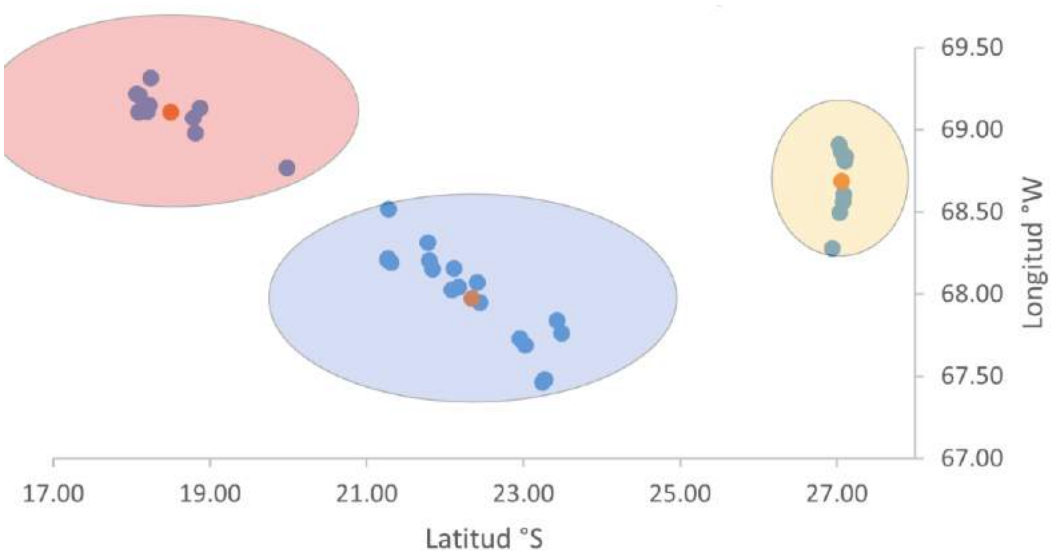


Figura 2. Distribución espacial de clústers, de color azul se representan los domos recopilados y de color anaranjado lo centroides obtenidos por el análisis multivariable.

La composición de los domos asociados a estos 3 clústers se observa en la tabla I. Los domos de composición andesítica se presentan mayormente en C1 con 18.42% del total, seguido por el C2 con 5.26% y ausente en el C3. Para los domos de composición dacitica, ocurren principalmente en el C2 (42.11%), luego en C3 (18.42%) y en menor porcentaje en C1 (10.53%). Finalmente, para los domos de composición riolítica se ubican en C3 con un 5.26% del total, seguidos por C2 con un 2.63% y totalmente ausentes en C1.

	A (%)	D (%)	R (%)
C1	18.42	10.53	0.00
C2	5.26	42.11	2.63
C3	0.00	18.42	5.26

Tabla I. Distribución de la composición de los domos en porcentaje de acuerdo con el total de datos recopilados. A: Andesiticos, D: Daciticos, R: Riolíticos.

Del análisis multivariable asociado a los datos de edades se obtuvieron 4 clústers (ver Fig. 3) de edades; El primer clúster con centroide en 0.164±0.028 Ma y con 17 domos asociados; El segundo clúster con centroide en 0.559±0.064 Ma y con 10 domos asociados; El tercer clúster con centroide en 1.268±0.207 Ma, con 6 domos; Y finalmente, el cuarto clúster con centroide en 2.254±0.151 Ma, con 5 domos relacionados.

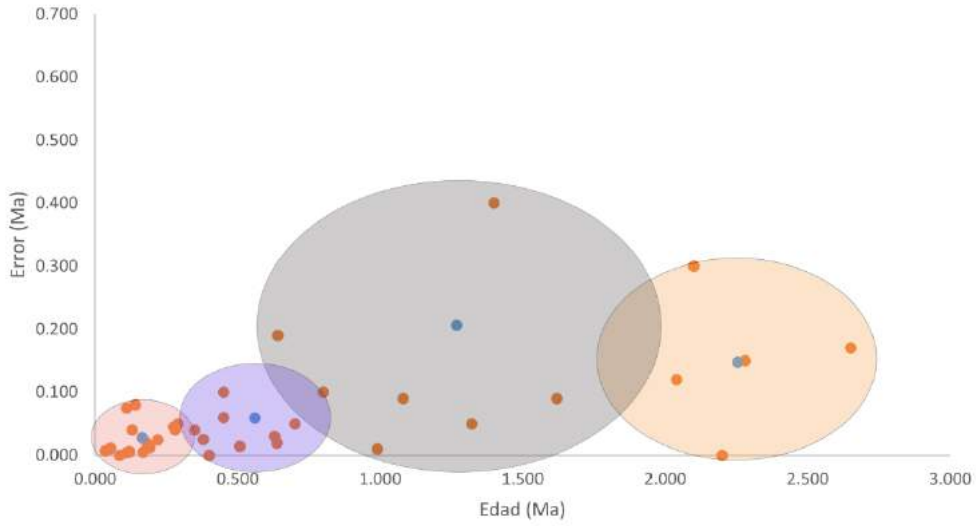


Figura 3. Distribución de clústers de edades, de color anaranjado se representan los datos radiométricos de domos recopilados y de color azul los centroides obtenidos por el análisis multivariable.

CONCLUSIONES

Los domos Cuaternarios de los Andes Centrales, en el norte de Chile presentan una marcada distribución norte-sur. Esto ha sido confirmado mediante análisis estadísticos multivariable, donde su distribución en el espacio-tiempo queda marcada, al relacionar las variables se observa que el C1 presenta la mayor cantidad de eventos composicionales andesiticos, siendo restringidos temporalmente en torno al clúster 1 de edades, mientras que sus eventos daciticos son restringidos al clúster 2 de edades, lo que se traduce en actividad principalmente del Cuaternario superior. El C2 indica una ocurrencia de eventos andesiticos, riolíticos y principalmente daciticos, que presentan actividad continua desde el clúster 4 al clúster 1 de edades, con un continuo aumento, desde un 16% de eventos en el Cuaternario inferior hasta un 42% de los eventos en el Cuaternario superior. Mientras que C3 -quien presenta el mayor numero de eventos riolíticos- presenta actividad continua desde el clúster 4 al 1 de edades, focalizando los eventos riolíticos en el Cuaternario superior.

REFERENCIAS

Baker, P.E., Gonzalez-Ferran, O. and Rex, D.C. (1987). Geology and geochemistry of the Ojos del Salado volcanic region, Chile. Journal of the Geological Society, 144(1): 85-96.

Barmin, A., Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2002). Periodic behavior in lava dome eruptions. Earth and Planetary Science Letters, 199(1-2), 173-184.

Calder, E. S., Lavallée, Y., Kendrick, J. E., & Bernstein, M. (2015). Lava dome eruptions. In The encyclopedia of volcanoes(pp. 343-362). Academic Press.

Clavero, J.E., Sparks, S.J., Polanco, E. and Pringle, M.S. (2004). Evolution of Parinacota volcano, Central Andes, Northern Chile. Revista geológica de Chile, 31: 317-347.

de Silva, S. L. (1991). Styles of zoning in central Andean ignimbrites; insights into magma chamber. In: Harmon, R.S. and Rapela, C.W. (Eds.): Andean Magmatism and its Tectonic Setting. Geological Society of America Special Paper, 265: 217-232.

de Silva, S.L., Self, S., Francis, P.W., Drake, R.E., Ramírez, C. (1994). Effusive silicic volcanism in the Central Andes: the Chao dacite and other young lavas of the Altiplano-Puna volcanic complex. J. Geophys. Res. 99 (B9), 17805–17825.

Fink, J. H., & Bridges, N. T. (1995). Effects of eruption history and cooling rate on lava dome growth. Bulletin of Volcanology, 57(4), 229-239.

García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., & Hérail, G. (2004). Hoja Arica, Región de Tarapacá, escala 1:250.000, Carta Geológica de Chile Nº 84.

Gardeweg, M. and Ramirez, C.F. (1985). Hoja Rio Zapaleri. II Region de Antofagasta. Escala 1: 250.000.

Gardeweg, M. and Ramírez, C.F. (1987). La Pacana caldera and the Atana Ignimbrite — a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of northern Chile. Bulletin of Volcanology, 49(3): 547-566.

Gardeweg, M., Clavero, J., Mpodozis, C., Pérez de Arce, C., & Villeneuve, M. (2000, July). El Macizo Tres Cruces: un complejo volcánico longevo y potencialmente activo en la Alta Cordillera de Copiapó, Chile. In Actas IX Congreso Geológico Chileno, Simposio Geología y Recursos Minerales de los Andes Centrales, avances del Proyecto Multinacional Andino, MAP(Vol. 2, pp. 291-295).

Giles D (2009) Dynamics of a long-lived magmatic system as indicated by variations in amphibole composition and textures in dacites erupted over 11 m.y. at the Aucanquilcha Volcanic Cluster, Central Andes, Chile. MS thesis.

Grunder, A., Klemetti, E., Feeley, C., Mckee, M. (2006). Eleven million years of arc volcanism at the Aucanquilcha Volcanic Cluster, northern Chilean Andes: Implications for the life span and emplacement of plutons. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, vol.97, p415-436.

Hawkesworth, C. J., Hammill, M., Gledhill, A. R., van Calsteren, P., & Rogers, G. (1982). Isotope and trace element evidence for late-stage intra-crustal melting in the High Andes. Earth and Planetary Science Letters; 58(2), 240-254.

James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R. (2013) An introduction to statistical learning. Springer.

Katsui, Y., & Gonzalez-Ferran, O. (1968). Geología del área neovolcanica de los Nevados de Payachata. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Publicación, 29, 61.

Lahsen, A., & Munizaga, F. (1979). Nuevos antecedentes cronologicos del volcanismo cenozoico superior de los Andes del Norte de Chile, entre los 19° y los 22° 30′ S. Actas II Congr. Geol. Chileno, Arica, 1, F61-F82.

Lindsay, J.M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., de Silva, S.L., Siebel, W., Emmermann, R. (2001). Magmatic evolution of the La Pacana Caldera system. Central Andes, Chile: compositional variation of two cogenetic, large-volume felsic ignimbrites. J. Petrol. 42 (3), 459–486.

MacQueen, J. (1967, June). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability(Vol. 1, No. 14, pp. 281-297).

Marinovic, S. and Lahsen, A. (1984). Hoja Calama: Región de Antofagasta, escala 1: 250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, 58: 140.

Németh, K., & Kereszturi, G. (2015). Monogenetic volcanism: personal views and discussion. International Journal of Earth Sciences, 104(8), 2131-2146.

Renzulli, A., Menna, M., Tibaldi, A., Flude, S. (2006). New Data of Surface Geology, Petrology and Ar-Ar Geochronology of the Altiplano-Puna Volcanic Complex (Northern Chile) in the Framework of Future Geothermal Exploration. XI Congreso Geòlogico Chileno, Antofagasta (7–11 August).

Rivera, G., Morata, D., Ramírez, C. (2015). Evolución Vulcanologíca y Tectónica del Área del Cordón Volcánico Cerro del Azufre – Cerro Inacaliri y su Relación con el Sistema Geotérmico de Pampa Apacheta, II Región de Antofagasta, Chile. Actas XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, pp. 556–559.

Schmitt, A. K. (2001). Gas-saturated crystallization and degassing in large-volume, crystal-rich dacitic magmas from the Altiplano-Puna, northern Chile. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B12), 30561-30578.

Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. Revista geológica de Chile, 31(2), 161-206.

Tierney, C. R. (2011). Timescales of large silicic magma systems: Implications from accessory minerals in Pleistocene lavas of the Altiplano-Puna Volcanic Complex, Central Andes.

Urzua, L., Powell, T., Cumming, W.B., Dobson, P. (2002). Apacheta, a New Geothermal Prospect in Northern Chile. 26. Geothermal Resources Council, pp. 65–69.

Vezzoli, L., Tibaldi, A., Renzulli, A., Menna, M. and Flude, S. (2008). Faulting-assisted lateral collapses and influence on shallow magma feeding system at Ollagüe volcano (Central Volcanic Zone, Chile-Bolivia Andes). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 171(1-2): 137-159.

Voight, B., Sparks, R. S. J., Miller, A. D., Stewart, R. C., Hoblitt, R. P., Clarke, A., & Cole, P. (1999). Magma flow instability and cyclic activity at Soufriere Hills volcano, Montserrat, British West Indies. Science, 283(5405), 1138-1142.

Walker, J., Moulds, T., Zentilli, M., Feigenson, M. (1991). Spatial and temporal variations in volcanics of the Andean Central Volcanic Zone (26 to 28ºS). Geological Society of America, vol.265, p139-156.

Wörner G., Harmon R.S., Davidson J.D., Moorbath S., Turner T.L., McMillan N., Nye C., López-Escobar L., Moreno H. (1988). The Nevados de Payachata Volcanic Region 18°S/69°W, N.Chile I. Geological, geochemical and isotopic observations: Bulletin of Volcanology, v. 30, p.287-303.

Wörner, G., Hammerschmidt, K., Henjes-Kunst, F., Lezaun, J. and Wilke, H. (2000). Geochronology (40Ar/39Ar, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from Northern Chile (18-22°S): implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. Revista geológica de Chile, 27: 205-240.

DETERMINACIÓN DE VARIABLES HIDRÁULICAS EN BIORREACTORES

Scotti A.[a]*, Cerioni J.[a], Visciglia M.[a], Cerioni S.[a], Biondi R.[a], Turano J.[a], Bianchini J.[a], Osisnaldi G.[a], Gómez M.[a]

[a] *Laboratorio BioAmbiental para Escalamiento Ingenieril- FRSR UTN- ICES-CNEA, ARGENTINA*

e-mail: scotti@cnea.gov.ar

RESUMEN

En el siguiente trabajo presentamos el Laboratorio Bioambiental de Escalamiento Ingenieril como herramienta para el escalamiento de ensayos de laboratorio a escala piloto o prototipo en trabajos de biorremediación de metales pesados. Para tal fin se definen variables físicas, químicas, biológicas e hidráulicas. En este proyecto se busca profundizar en las variables hidráulicas definiendo la ley que ajusta al modelo, caudales, tipo de riego, tiempo de retención y la constante hidráulica Kh de los distintos estratos de relleno a nivel de biorreactores. El tiempo de retención hidráulica del fluido es importante para los ensayos de biogeoquímica en biorremediación y se relaciona con la partición de metales entre percolación a cámara colectora y tiempo de permanencia en la matriz sustrato para ser afectada por el sistema físico-químico-biológico de biorremediación. El objetivo de este trabajo es determinar las variables hidráulicas flujo, caudal y Kh del sustrato suelo con el agregado de cenizas volcánicas, y la Kh cuando se agrega el filtro de piedra, hipotetizando que las condiciones fueron adaptadas para que el modelo siga la Ley de Darcy. Para ello se construirán 4 biorreactores, 2 para tratamiento y 2 para control. En el control tomamos los caudales de ingreso y egreso, sólo con relleno de filtro de piedra. En el tratamiento agregamos el sustrato suelo-cenizas volcánicas sobre el filtro de piedra.

Palabras Clave: Biorreactores, Flujo vertical laminar, Constante hidráulica- Ley de Darcy.

INTRODUCCIÓN

Nivel de maduración tecnológica (TRL)

La maduración de una tecnología tiene 9 niveles (Technology Readiness Levels: TRL), que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real (Mankins, J.C.1995). Los tres primeros niveles (TRL 1-3) abordan la investigación tecnológica más básica hasta llegar a una primera prueba de concepto. El desarrollo tecnológico se lleva a cabo desde los niveles siguientes hasta llegar a un primer prototipo (TRL 4-6). El TRL 6 establece la validación del sistema o subsistema en un entorno relevante (un entorno con condiciones que se aproximan o simulan suficientemente las condiciones de operación en un entorno real), mientras que el TRL 7 establece la validación y certificación completa en un entorno real. El TRL 8 aborda un sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones, y el TRL 9 establece un sistema probado con éxito en un entorno real “ver Fig. 1”. Actualmente, se utilizan estos criterios para cuantificar la madurez de la transferencia tecnológica en diversos programas internacionales, tanto

de la Unión Europea como de EE. UU (por ejemplo, Horizon 2021-2025, Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), etc.).

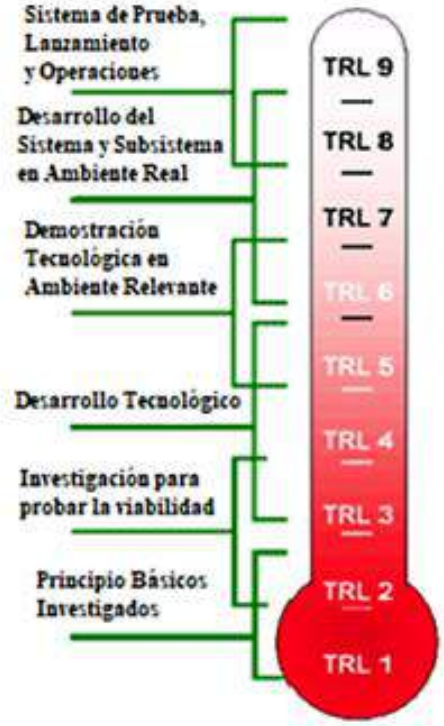


Figura. 1. TRLs en los distintos estadios de la generación del conocimiento y su transferencia tecnológica a escala operativa sostenible industrial. *Fuente: NASA Technology Readiness Levels*.

Laboratorio BioAmbiental

La Facultad Regional San Rafael (FRSR) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) junto al Centro Internacional de Ciencias de la Tierra (*International Center for Earth Sciences*, ICES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), pusieron en marcha el Laboratorio Bioambiental de Escalamiento Ingenieril. En este laboratorio, se pueden escalar ensayos realizados a nivel de laboratorio inicial de comprobación de prueba de concepto "ver Fig. 2" para llevarlos a escala de prototipo o prueba piloto "ver Fig. 3 y 4" y, posibilitar el desarrollo a nivel industrial, (Scotti A., et al. 2020). A través de este laboratorio, es posible probar una tecnología dada en un entorno real con menor riesgo de fracaso. El uso del laboratorio permite establecer las variables de caudal, rellenos, pH, Eh, retención hidráulica, entre otras, que hacen posible la calibración del proceso para llevar el protocolo a territorio. (Scotti A. Silvani, V. et al, 2019a)

Los biorreactores son a una escala menor que los módulos a TRL 6 "ver Fig. 4". Ambos contienen una pendiente del 6%, compuestos por tres estratos de gravas de distintas granulometrías formando un filtro, sobre el mismo se ubica el sustrato que contiene al sistema biorremediador "ver Fig. 3 y 5". (Scotti A. et al. 2020).



Figura 2. Armado de biorreactores en escalamiento de pruebas de concepto a TRL 3.

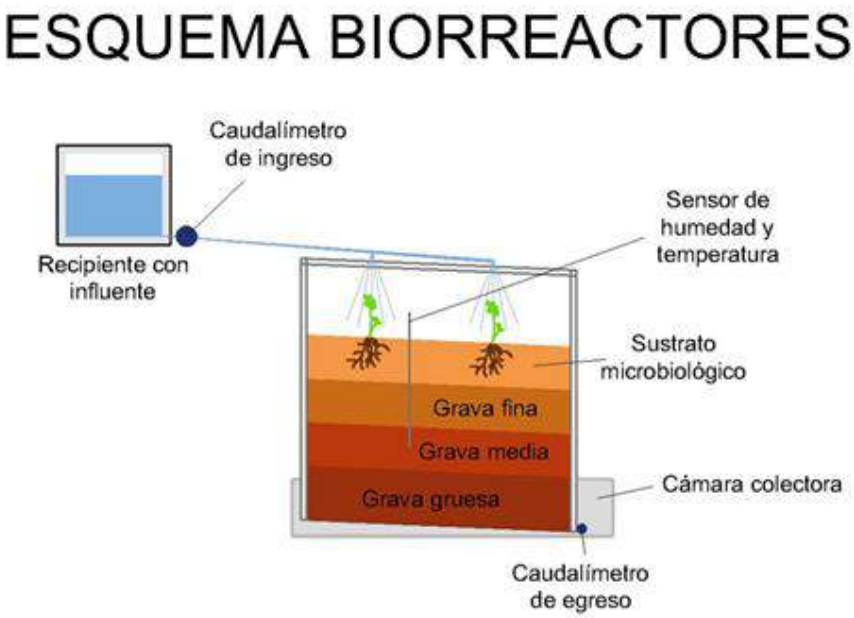


Figura 3. Esquema de los componentes de los biorreactores.



Figura 4. Módulos para escalamiento de TRL 3 a TRL 6 en medio relevante.



Figura 5. Esquema de relleno en los módulos de depuración vegetal (MDV) para biorremediación de suelos y/o aguas contaminadas.

Los ensayos a escala laboratorio son escalados primero a nivel de biorreactores, para obtener la calibración de las variables físicas, químicas y biológicas para luego llevar el protocolo a mayor escala en los módulos (MDV) y validar a TRL 6 la calibración de variables de modo tal de obtener un protocolo aplicable a territorio.

Sistema biorremediador

El sistema biorremediador está conformado por una especie vegetal colonizada por una micorriza arbuscular del Banco de Glomeromycota del IBBEA que funciona en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA, que crece en una mezcla de suelo y ceniza volcánica al 50% V/V y un catalizador enzimático.

Sistema de riego

Se diseñó un sistema de control de riego, que consiste en un reservorio de agua, conectado a un conducto que posee un regulador de caudal que permite la adecuación del sistema a las necesidades propias de la especie vegetal.

Modelos mecanísticos

Los modelos mecanísticos que simulan el comportamiento de los humedales como reactores biológicos abordan matemáticamente los diferentes procesos y sus interacciones, lo cual ayuda considerablemente al entendimiento y a la interpretación del rendimiento de depuración. Algunos ejemplos de estos tipos de modelos son el modelo de Wynn y Liehr (2001) y el modelo CW2D de Langergraber (2005).

- *Modelo de Wynn y Liehr (2001)*

El modelo consta de seis submodelos interrelacionados que representan: el ciclo del carbono y del nitrógeno, los balances de agua y oxígeno y el crecimiento, metabolismo y lisis de las bacterias heterótrofas y autótrofas. Las transformaciones del fósforo no están consideradas puesto que son principalmente de naturaleza físico-química y el enfoque del modelo es mayoritariamente microbiológico. Una hipótesis muy importante es que la eliminación de sólidos suspendidos es total, es decir, que no hay sustancias particuladas en el efluente. El comportamiento hidráulico es simulado con el modelo de tanques en serie, que imita el régimen de mezclado, y la ley de Darcy, que simula el flujo a través de un lecho poroso.

- *Ley de Darcy*

Está definida en la ecuación (1) "ver Ec. (1)", solo es válida para flujo laminar, describe la pérdida de carga en un medio poroso que sirve para el diseño de humedales de flujo subsuperficial (FSS) usando suelo y arena como medio del lecho. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces, la ecuación de Ergun es más apropiada, puesto que ésta es utilizada para el flujo de fluidos en lechos porosos con régimen turbulento (Costa, 1985). Como en nuestro caso el caudal de ingreso es bajo y sobre suelo saturado consideramos mínima la turbulencia y planteamos como hipótesis que nuestro sistema se modeliza con la ley de Darcy. Donde K_H es la conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, A_T es el área de la sección transversal perpendicular al flujo y S es el gradiente hidráulico o pendiente de la superficie del agua en el sistema.

$$Q = K_H . A_T . s \qquad \text{Ecuación (1)}$$

La Ley describe los flujos de fluidos continuos con caudal constante, a través de materiales porosos. Se deben definir los límites de la aplicación de la Ley de Darcy, es decir, las condiciones que deben existir para que se cumpla lo enunciado por esta ley. El coeficiente de permeabilidad es esencialmente constante en suelos saturados hasta valores de succión muy bajos próximos a una atmósfera; el coeficiente de permeabilidad cambia rápidamente desde la condición de succión nula, o cercana a cero y la humedad residual. En los suelos no saturados debe tratarse entonces con funciones de permeabilidad y no con coeficientes de permeabilidad (Fredlund, 2009). Con el fin de discutir los límites de aplicación de la Ley de Darcy es conveniente definir las condiciones que deben cumplir los fluidos y los materiales empleados, así tales condiciones pueden resumirse como sigue:

1. El flujo que pasa a través del material poroso debe ser gravitacional. no se considera el flujo forzado por energía mecánica, química, eléctrica, térmica o de otra naturaleza cualquiera.
2. Se debe asegurar que el flujo sea estacionario durante el proceso de flujo.
3. El medio permeable debe estar saturado, sin presencia de aire para evitar la condición de multifluido, o multifases asegurando la valoración de la permeabilidad y el movimiento del fluido por los poros del medio permeable.

4. La estabilidad del agua en los piezómetros se toma como indicador necesario y suficiente para aceptar la condición de flujo laminar.
5. La relación lineal entre la velocidad de descarga y la pérdida de presión por unidad de longitud a través del material, se toma como indicativo de que el flujo a través del medio es laminar.
6. El medio permeable debe ser homogéneo e isotrópico, con el fin de permitir el análisis del flujo unidireccional.
7. Las características físicas y químicas de los medios deben permanecer constantes: el líquido no puede reaccionar con el medio, la porosidad y la permeabilidad de este no deben cambiar durante el ensayo. Las reacciones químicas pueden dar lugar a cambios en la porosidad, ya sea por cementación o por disolución, y por lo tanto pueden cambiar la permeabilidad del medio junto con la aplicación de fuerzas externas, que dan lugar a cambios en la relación de vacíos.

Flujo perpendicular a través de distintas capas, determinación de k.
Si el flujo es perpendicular a las capas (los dos sondeos, que suponemos abiertos en sus extremos, indican el gradiente que provoca el flujo), la permeabilidad equivalente (Kv) es igual a "ver Ec. (2)":

$$K_v = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{Ki}}$$

Ecuación (2)

siendo:
Kv = conductividad hidráulica vertical equivalente
Ki = conductividad hidráulica de cada una de las capas
bi = espesor de cada una de las capas
B = espesor total, suma de todos los espesores

- *Tiempo de permanencia del agua en el biorreactor*

Considerando la constante hidráulica, el gradiente hidráulico, las condiciones físico-químico-biológicas y el caudal de ingreso en el biorreactor, se puede determinar cuánto tiempo permanece el fluido dentro de los estratos. Así frente a un caudal de ingreso determinado podemos establecer cuánto volumen y tiempo estará disponible el agua para el consumo de las especies vegetales, la retención físico-química-biológica, por ejemplo, en la glomalina o en las arcillas y cenizas volcánicas, como también la fuerza de percolación y salida a cámara recolectora, lo cual nos permite establecer coeficientes de partición del contaminante en: acumulado en biomasa, bioestabilizado en sustrato y lixiviado a cámara colectora.

HIPÓTESIS

En base a lo mencionado anteriormente planteamos tres hipótesis:

1-El flujo de líquido dentro del biorreactor sigue un modelo mecanístico aproximándose al descrito en la Ley de Darcy.
2- La determinación de la constante de retención hidráulica permite calibrar la permeabilidad del fluido en el biorreactor y vincularlo con la partición del contaminante entre bioacumulación y percolación a cámara colectora.

3- La determinación de variables físico-químico-biológicas a TRL3 permite la transferencia a TRL6 con mejores resultados.

OBJETIVO

Determinar en biorreactores la variable hidráulica, K_H definiendo modelo, caudales, flujo, tipo de riego, tiempo de retención hidráulica para el estrato suelo-ceniza y piedra.

METODOLOGÍA

Se dispondrán de 4 biorreactores, 2 para tratamiento y 2 para control. En el control tomamos los caudales de ingreso y egreso, sólo con relleno de filtro de piedra. En el tratamiento agregamos el sustrato suelo-cenizas volcánicas. La pendiente, mediciones de caudal de ingreso y egreso, el sistema de saturación y flujo de ingreso constante, la protección frente a condiciones adversas, y los sensores de humedad, temperatura y pluviómetros serán dispuestos según el esquema de la Figura 6 “ver Fig. 6”. El relleno del biorreactor está compuesto de la siguiente manera: estrato superior, mezcla de suelo con cenizas, estrato siguiente: piedras de 1 cm de diámetro aproximado

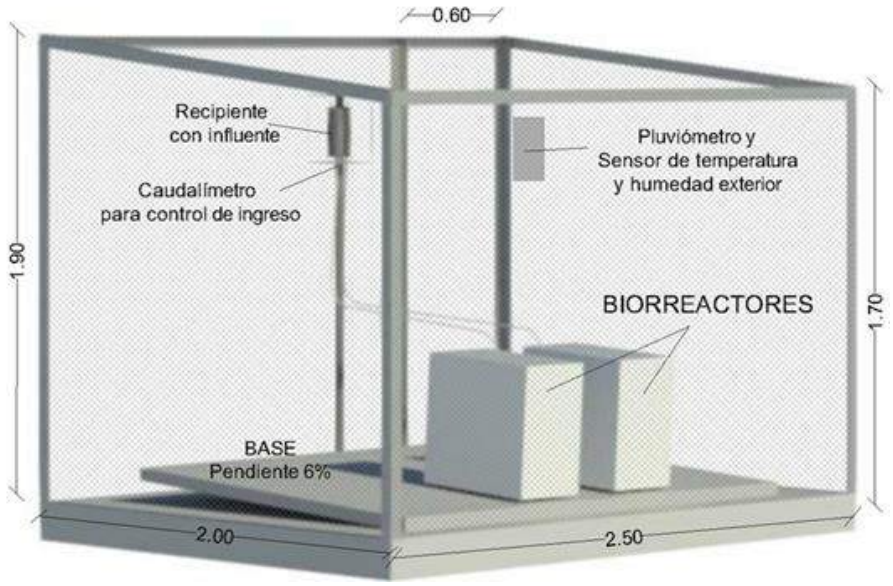


Figura 6. Esquema metodológico de emplazamiento de los biorreactores.

Cálculo de K_H para el estrato suelo-ceniza del biorreactor
Se utilizará para el cálculo la Ecuación 1 y la Ecuación 2 presentada en este trabajo.

CONCLUSIONES

Mediante el ajuste de las condiciones presentadas en este trabajo podemos demostrar la hipótesis 1 y aplicar la Ley de Darcy al cálculo de las constantes hidráulicas. No obstante, hay que tener en cuenta que el estudio de las condiciones físico-químico-biológicas del sistema, su dinámica y sus variables, puede ser llevado a cabo a baja escala, y en un corto tiempo como se llevará a cabo en los biorreactores. Además, para

el análisis y discusión se tendrán en cuenta factores utilizados en otras modelizaciones aplicadas en humedales construídos (CW) subsuperficiales (SS) puestos al servicio de la industria como señala Langergraber (2009). El MDV descrito en este trabajo es un CW y bajo las condiciones de flujo y relleno explicitadas es de tipo subsuperficial (SS). La calibración de las variables a baja escala, en biorreactor, arroja un protocolo de trabajo para aplicarse en un entorno simulado en el MDV a mayor escala. El escalamiento presentado en este trabajo permite el pasaje de TRL 3 a TRL 6 con menor riesgo de fracaso.

REFERENCIAS

Costa, E., Calleja, G., Ovejero, G., De Lucas, A., Aguado, J. y Uguina, M.A. (1985). Ingeniería Química. 3. Flujo de Fluidos. Ed. Alhambra, Madrid.

Fredlund DG. (2000). The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. Can. Geotech. J. 37: 963–986.

Langergraber, G., & Šimůnek, J. (2005). Modeling Variably Saturated Water Flow and Multicomponent Reactive Transport in Constructed Wetlands. *Vadose Zone Journal*. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0166

Langergraber, G., Giraldi, D., Mena, J., Meyer, D., Peña, M., Toscano, A., Brovelli, A., & Korkusuz, E. A. (2009). Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.057

Mankins, J.C., (1995). Technology Readiness Levels, NASA

Scotti A., (2016) Informe Técnico Ingeniería.de Proceso. CNEA- ICES

Scotti, A., Cerioni, J., Reviglio, H., Silvani, V., Godeas, A., Saavedra, V., Visciglia, M., Cerioni, S., Biondi, R., Turano, J., Quiroga, C., Genovese, F., and Gomez, M. (2019a). Scaling to Technological Readiness Levels 6 in the Bio-Environmental Laboratory. Case Report, Vol 4: 3. Robotic Automation Engineering Journal. ISSN 2577-2899 DOI 10.19080/RAEJ.2019.04.555637

Scotti, A., Vanesa Analia Silvani, Juan Cerioni, Mauricio Visciglia, Matías Benavidez & Alicia Godeas (2019b). Pilot testing of a bioremediation system for water and soils contaminated with heavy metals: vegetable depuration module, International Journal of Phytoremediation, 21:9, 899-907, DOI: 10.1080/15226514.2019.1583634

Scotti A., Cerioni J., Reviglio H., Visciglia M., Cerioni S., Biondi R., Saavedra V., Silvani V., Godeas A., Turano J., Quiroga C., Genovese F., Gómez M. (2020). Escalamiento Ingenieril a niveles de maduración tecnológica (TRL) 3 a 6 en el Laboratorio BioAmbiental. Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA Actas de Trabajos Completos del E-ICES 14. Editado por Martín Pedro Gómez; Dino Filipussi ; Luis Lenzano. 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 2020. Libro digital, PDF Archivo Digital: descarga y online ISBN 978-987-1323-64-7 http://www.uncuyo.edu.ar/ices/upload/actas-e-ices-14final3.pdf

Wynn, T.M. y Liehr, S.K. Development of a constructed subsurface-flow wetland simulation model. Ecological Engineering, 2001, 16, 519-536

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MULTIDISCIPLINARY STRATEGY FOR GALLIUM, IRON AND MANGANESE RECOVERY FROM MINING RESIDUES IN A CONTEXT OF CIRCULAR ECONOMY.

Scotti A.[ab], Milia S.[b], Silvani V.[d] , Cappai G.[bc], Guglietta D.[b], Trapasso F.[b], Belardi G.[b], Salvatori R.[e], Tempesta E.[b], Passeri D.[b], Ubaldini S.[b], Godeas A.[d], Babay P.[f] , Gonzalez F.[f], Leguizamón R.[f], Gómez M.[a]

[a]*International Center for Earth Sciences, National Atomic Energy Commission, FRSR- UTN- Bio Environmental Laboratory, San Rafael, Mendoza, ARGENTINA*
[b]*Institute of Environmental Geology and Geoengineering, Italian National Research Council, Research Area of Rome 1, Monterotondo, ITALY*
[c]*Department of Civil-Environmental Engineering and Architecture, University of Cagliari, ITALY*
[d]*Faculty of Exact and Natural Science, Institute of Biodiversity and Applied and Experimental BIology, National Scientific and Technical Research Council - University of Buenos Aires, ARGENTINA*
[e]*Institute of Polar Sciences, Italian National Research Council, Research Area of Rome 1, Monterotondo, ITALY*
[f]*National Atomic Energy Commission, Constituyentes Atomic Centre, FRX Laboratory, Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: scotti@cnea.gov.ar

ABSTRACT

Mining and mineral-processing wastes have been giving a lot of concern in recent times. We have evaluated an integrated multidisciplinary strategy for mining residues characterization, as well as for the recovery of secondary (e.g., Fe, Mn) and critical (e.g., Ga) raw materials. After the in situ sampling campaigns in Bichakundi Joda West iron and manganese mine (Keonjhar district, State of Odisha, India), residues have been characterized and the acquired mineralogical, chemical and spectral information have been used to create a map of mining residue deposits by means of the new multispectral satellite Sentinel-2A classification. Furthermore, mycorrhizal-assisted phytoextraction of metals from previously classified soils, based on sunflowers colonized by an AM fungal strain GA5 Rhizophagus intraradices, was carried out in the perspective of subsequent recovery of Ga, Fe and Mn from biomass using hydrometallurgical and electrochemical techniques. The bioconcentration factors in aerial and radicular parts (BC_S and BC_R, respectively), and translocation factors (TF) followed the order Ga>Mn>Fe for BC_S and TF, while for BC_R was Ga>Fe>Mn. The results were used to estimate the bioextracting potential by phyto-mycoremediation into a Vegetable Depuration Module (VDM): the highest extraction was estimated for Fe (60 g/VDM), followed by Mn (35 g/VDM) and Ga (1.02 g/VDM), thus confirming a good potential for their subsequent recovery by hydrometallurgical techniques with final purification by selective electrodeposition. Results are encouraging and the application of such multidisciplinary approach can be important to develop a circular model for sustainable exploitation of mining residues.

Keywords: Circular Economy, Hydrometallurgy Techniques, Mining Resource Recovery, Phyto-mycoremediation, Remote Sensing Map

INTRODUCTION

Soil contamination is typically caused by industrial activity, mining and smelting practices, agricultural chemicals or improper disposal of waste, and it represents a serious threat for both the environment and human health. A smart economy minimizes the production of waste and reuses waste as a resource. Resource constraints and environmental pressures will accelerate the transformation from a linear "extraction-use-throw away" model of production and consumption to a circular one. Moving towards a near-zero waste society has an environmental rationale, and it increasingly represents a factor of competitiveness (Guglietta et al., 2020).

An integrated multidisciplinary approach for characterization and analysis of mining waste, and its reuse as resource in the iron and manganese mine in Bichakundi (near Joda West, Orissa-region, India), was recently validated (Guglietta et al., 2020). Such an integrated approach would simultaneously promote both economic development and environmental protection. Moreover, the integration of different expertises from characterization to exploitation, passing through mining, reusing and monitoring, will be an excellent mean to consolidate the knowledge of the various processes, to apply innovative integrated technologies, to create a synergy of efforts and results, developing a circular model for sustainable exploitation of mining wastes towards near-zero waste. The aim is to promote the transition to a more circular model that can strongly contribute, with products, processes and business models that are designed, to maximize the value and utility of resources while at the same time reducing adverse health and environmental impacts (Fig. 1). In particular, this multidisciplinary strategy combines:

1. new sensitive technologies (such as remote sensing technologies) for mapping and classification of mining wastes containing minerals and metals;
2. new solutions for chemical, physical and morphological characterization;
3. eco-innovative methodologies for reusing mining waste as resource;
4. phyto-mycoremediation of mining wastes, and the consequent accumulation of heavy metals in biomass;
5. recovery of heavy metals from biomass through hydrometallurgy and/or electrochemical methods.

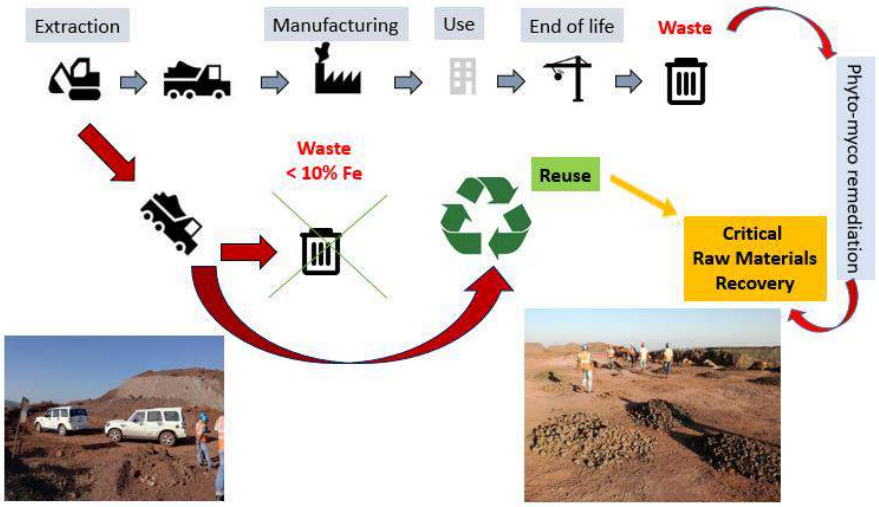


Figure 1. A scheme of the proposed multidisciplinary strategy for classification and reuse of iron, gallium and manganese mining wastes (Guglietta et al., 2020).

The synergy between points 1 and 4 is of particular interest, since it couples low-cost, highly efficient remote sensing and bioremediation technologies. As to remote sensing classification (i.e., point 1), it has highlighted mining waste deposits rich in Fe and Mn in the mine area and all different kinds of data have been stored in a geodatabase (Guglietta et al., 2020). The geodatabase dedicated to mining waste represents a powerful tool for mining waste management and for selection of samples containing minerals and metals to treat by phytoremediation technique. As to phytoremediation, it is widely recognised as an environmental friendly technique that uses plants to remove pollution at greatly reduced costs and minimum adverse side effects (Glick, 2003). Some members of Asteraceae and Poaceae plant families accumulate large amounts of specific heavy metals (HMs) and radionuclides in their tissues (Ker and Charest, 2010). Roots of these hyperaccumulator plant species establish mutualistic arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis with fungi of the phylum Glomeromycota (Smith and Read, 2008). In this association, the obligate biotrophic fungi obtain carbon compounds from their hosts, and in return, they provide soil nutrients to plants such as phosphorus, nitrogen, and others micronutrients. In addition to the benefits on nutritional supply and plant growth improvement, the AM fungi play a key role in stress alleviation, such as that imposed by excess HM (Lenoir et al., 2016). Some mechanisms responsible for the amelioration of HM toxicity in the host plants mediated by the AM fungi are known, such as sequestration and accumulation of different metals by AM fungal structures (spores, mycelia, vesicles), and the modulation of genetic expression in the detoxification process (Lenoir et al., 2016; Gohre and Paszkowski, 2006). The AM symbiosis is frequently included in the bioremediation strategies of different metal polluted soils (Ker and Charest, 2010; Yang et al., 2016). Many studies have demonstrated that the AM association established between sunflowers (*Helianthus annuus L*.) and the AM fungus *Rhizophagus intraradices* is effective for the uptake and accumulation of HMs and radioisotopes (Ker and Charest, 2010; Rivelli et al., 2012). In previous assays, we found significant improvement in HMs acquisition when sunflower plants were colonized by the AM fungus *R. intraradices* strain GA5 grown in a substrate supplemented with volcanic ash and 350 ppm zinc (Zn). Recently, an Argentinean national patent application was requested for this bioremediation system (BS) comprised of "*H. annuus*-*R. intraradices*-Zn 350-volcanic ash" as a novel advance for bioremediation of contaminated environments (Scotti et al., 2013, AR090183A1). Many studies have demonstrated that Zn acts as an enzymatic cofactor in many cellular reactions and induces the synthesis of cysteine-rich peptides such as metallothioneins (Scotti et al., 2011; Barbosa et al., 2017). Metallothioneins are involved in metal homoeostasis and detoxification of toxic elements in many organisms, including hyperaccumulator plants and AM fungi (Lanfranco et al., 2002; Barbosa et al., 2017). Additionally, the beneficial properties of volcanic ash for water and nutrients absorption, as well as removal of HMs from contaminated wastewater, are widely reported (Babel and Opiso, 2007).

The synergistic coexistence of soil, water, plants, and soil microorganisms has been also exploited in constructed wetlands, which imitate the hydrological system of natural wetlands and have become a simple, low-cost alternative for wastewater treatment (Kadlec et al., 2000; Wynn and Liehr, 2001; Mena et al., 2008; Madera-Parra, 2016). The BS placed into an innovative constructed wetland called Vegetable Depuration Module (VDM) (Scotti et al., 2019) was proposed as a scaling tool to reach technology readiness level (TRL) 6 (i.e., pilot test) by simulation of a relevant environment composed of high concentrations of Mn and Fe (Ibañez de Aldecoa Quintana, 2014). Using this module, the first cycle of an engineered process for decontamination of polluted environment comprised of wastewater and substrate (soil) with an excess of HMs was simulated. VDM consists of an environmentally closed

pool connected to a hydraulic system with vertical flow, and a collection chamber where effluents can be measured and recirculated. This percolated liquid fraction is either reintroduced into the VDM for new treatment or conducted to another VDM with different Eh-pH conditions that favour metal mobilization by shifting the ionic equilibrium. Finally, treated wastewater is released to the environment when contaminants are below threshold levels.

In this study, the outcomes of mining wastes mapping by remote sensing technologies and spectral and mineralogical characterization were used for the selection of mining waste samples rich in Fe, Mn and Ga to be treated in a lab-scale (TRL-2) phyto-mycoremediation system based on *Helianthus annuus* L. (i.e., sunflower) and AM fungus *Rhizophagus intraradices*. In the perspective of subsequent *on-site* (TRL-6) treatment of Bichakundi mine wastes, results achieved at TRL-2 were used to estimate the bioextracting potential of a VDM with mycorrhizal assisted sunflowers.

METHODOLOGY

The study area

The iron and manganese mine area of Bichakundi is located in the village of Joda, in the Keonjhar district of Odisha (India) (Fig. 2). *In situ* sampling campaign was carried out by scientific and technical staff of the Institute of Environmental Geology and Geoengineering (National Research Council, CNR, Italy) in collaboration with TATA Steel and the National Environmental Engineering Research Institute (NEERI-India). In particular, 36 different kinds of samples have been collected from waste, stock deposits and dumps. For each sample, additional information consisting of GPS coordinates, pictures and a brief description of the sampling area were gathered. Furthermore, for each sample about 200 g have been selected for further laboratory analysis (chemical, physical and spectral analysis) and remote sensing analysis at National Research Council (CNR) in Italy.

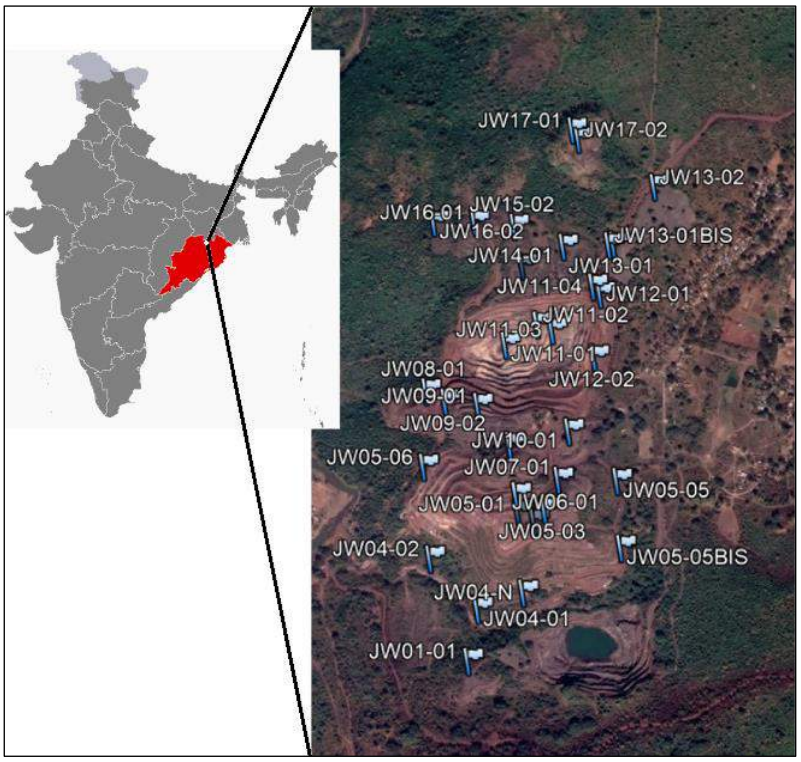


Figure 2. Location of the study area and *in situ* sampling campaign (Guglietta et al., 2020).

The Joda West geodatabase

The Joda West geodatabase offers a platform for the development of waste research and the fair comparison of characterized waste samples in order to facilitate the mining waste management and their reuse and the possible recovery of raw materials from mining waste. In this study, the waste is the product of mining works related to the exploration of iron and manganese minerals.

In particular, the *in situ* observations, results of statistical, spectral, physical and mineralogical analysis as well as of satellite classification process are collected into a geodatabase to identify the mining wastes stored in old waste dumps or fresh landfills in the Joda West mine. The following information is recorded for each sample: location (including coordinates); details of the study site (including land cover, land use, geomorphology); information and observations on the waste (including results of analysis, pictures, color, and area if known). The Joda West geodatabase is built using ESRI's ArcGIS 10.2 software. This geodatabase is useful for progressively identifying the waste areas of spatial importance for optimized management as well as highlighting the mining wastes rich of Fe and Mn that could be potentially used for phyto-mycoremediation process.

In order to provide a useful tool for researchers as well as decision makers (stakeholders), the GIS layers are exported and reassembled as a project file in Google Earth. The final Joda West project file is in a Google Earth KMZ (keyhole Markup Language- zipped) format. The main objective of the Joda West Google Earth file is to create an attractive project that contains all the scientifically derived data set but still a simple tool that could be used for further analysis by other researchers.

The phyto-mycoremediation system

Iron- and manganese-rich soil samples classified as Class 1 and 2 by Sentinel-2A remote sensing were used to carry out the phyto-mycoremediation tests at TRL-2 scale. As reported in Guglietta et al. (2020), such samples also contained relevant amounts of Gallium (i.e., a critical raw material), which was worthy of being recovered.

Fungal strain selection and propagation. The phyto-mycoremediation system consisted of sunflowers (*Helianthus annuus L.*, hybrid cultivar DK4045, Syngenta seeds) colonized by an AM fungal strain GA5 *Rhizophagus intraradices* (provided *in vitro* by Bank of Glomeromycota, Faculty of Exact and Natural Sciences, Buenos Aires University, www.bgiv.com.ar) grown in a substrate comprised of a homogeneous mixture of soil and volcanic ash (50:50, v/v) and supplemented with $ZnSO_4$ (as catalyst).

A substrate subsample (10 g) of contaminated soil was used to detect AM fungal structures; it was wet sieved and decanted and checked for AM fungal spores. Non-indigenous AM fungal propagules were detected in soil samples. The GA5 strain was propagated using transformed carrot roots grown in minimal medium as described by Silvani et al. (2014). The AM fungus *R. intraradices* strain GA5 has been reported to promote tolerance to different abiotic stresses in several plant species and have potential as bioremediator (Bompadre et al., 2014; Scotti et al., 2019).

TRL-2 experimental setup. The experimental design of the TRL-2 system consisted of 16 pots (height, 12 cm; diameter, 13.5 cm), as named and detailed below:

- MA1-4$^+$. 4 pots filled with mixed contaminated soil (CS) from different areas of the Indian mine and Lipari's volcanic ash (VA) in a 1:1 (v/v) ratio, completing to 500 mL and 125 mL granular pumice stone (PS; mean diameter, 3-6 mm). Considering

the CS only, 300-500 ppm $ZnSO_4$ were added. At least three *Helianthus annuus* seeds were planted and inoculated with a piece of GA5 *in vitro* culture with at least 300 spores in each pot.

- MA1-4$^-$. 4 pots filled with mixed CS and VA in a 1:1 (v/v) ratio, completing to 500 mL and 125 mL PS. Considering the CS only, 300-500 ppm $ZnSO_4$ were added. At least three *Helianthus annuus* seeds were planted in each pot.
- B1-4$^+$. 4 pots filled with 500 mL fertile commercial topsoil (FCT) and 125 mL PS. At least three *Helianthus annuus* seeds were planted and inoculated with a piece of GA5 *in vitro* culture with at least 300 spores in each pot.
- B1-4$^-$. 4 pots filled with 500 mL FCT and 125 mL PS. At least three *Helianthus annuus* seeds were planted in each pot.

Pots were placed in a thermostated room (18-21 °C) and irrigated twice a week (50 mL per pot), in order to provide a sufficient amount of water for plant growth, without causing metals leaching.
On day 30, among the specimens of *Helianthus annuus* grown in each pot, only the one having the best leaves development was left in each pot.
Representative soil samples were taken from each pot on days 0 and 133 (i.e., the end of the experimental campaign) and biomass samples on day 133. The soil samples were dried and micronized under 70 microns in size by vibrating rotary cup mill at 900 rpm motor speed and a standard 100 ml steel crews. The grinding containers incorporate an anvil ring and puck to pulverize the sample by an eccentric vibratory action. Analyses for metals content quantification, physical and mineralogical characterization were carried out by X-Ray Powder Diffraction (XRPD) and X-Ray Fluorescence (XRF) techniques by National Energy Atomic Commission and Institute of Environmental Geology and Geoengineering. The same analyses were carried out also on volcanic ash and granular pumice stone samples collected at the beginning of the experimental campaign.

The Vegetable Depuration Module (VDM). The estimation of Fe, Mn and Ga bioextracting potential at TRL-6 was carried out considering the results achieved at TRL-2 and the amount of mycorrhizal assisted biomass grown in an already existing VDM (Fig. 3) installed at the Centro de Desarrollo Regional Los Reyunos of Universidad Tecnológica Nacional (San Rafael, Mendoza, Argentina), which treated Fe and Mn contaminated soil (Scotti et al., 2019). The module consists of one pool connected to collection chambers through a hydraulic system. Pool has a width of 2.8 m, a length of 5.0 m, and a depth ranging from 0.6 m (inlet end, lower depth) to 0.9 m (outlet end, upper depth), resulting in a height difference (Δh) of 0.3 m and a slope (Δh/length) of 6%. The collection chamber has a length of 1 m, a width of 2.8 m, and a depth of 1 m. The VDM is isolated from the external environment by a waterproofing system and a metallic net-covered greenhouse with a polyethylene anti-hail film. The water runs through pipes connected to a reserve tank and a water pump that drives the vertical flow towards the pool. The remaining fraction of percolated liquid is drained towards the collection chamber. The first 10 cm layer of VDM pool was filled with large gravel (~10 cm diameter) overlain by 15 cm of medium sized gravel (~5 cm diameter) and then 20 cm of small-sized gravel (~1 cm diameter). The uppermost 15 cm superficial layer, representing the growth substrate of the BS, consisted of a homogeneous mixture of contaminated soil and volcanic ash (50:50; v/v) supplemented with 350 ppm of $ZnSO_4$ (Scotti et al., 2019).

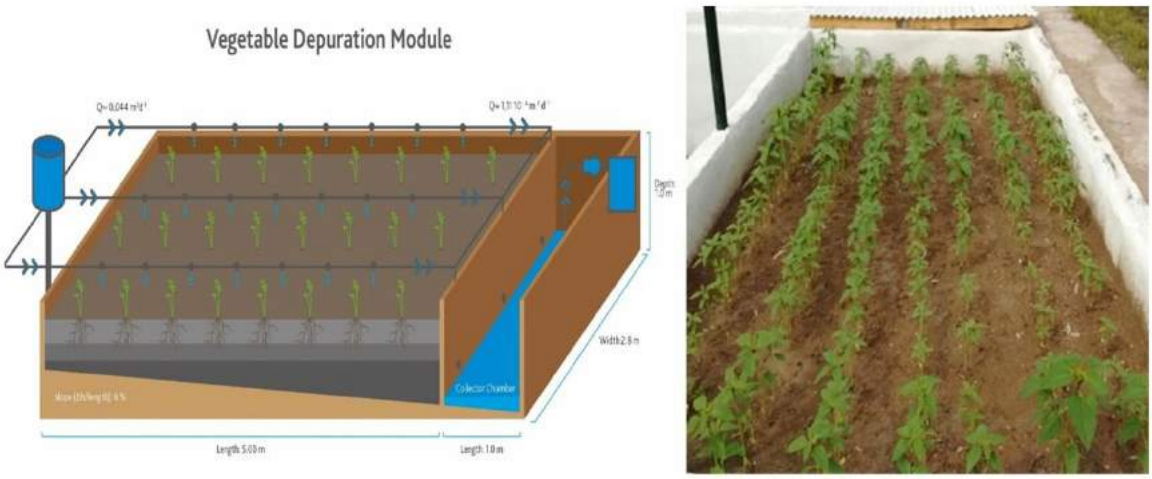


Figure 3. Diagram of the Vegetable Depuration Module and the phyto-mycoremediation system (*Helianthus annuus* – *Rhizophagus intraradices*) with 2 m^3 volume and 20 plants per m^2 (Scotti et al., 2019).

Chemical analyses and biological characterization

As for biomass, the entire sample was weighed, placed in a Teflon beaker with 3 mL of HNO_3 (sub) and 1 mL of H_2O_2, and digested in the microwave. After digestion, the solution was transferred to a 10 mL flask (5 mL in the case that the sample mass was less than 0.05 g) and brought to volume with water. Elemental determination was carried out by Total Reflection X-ray Fluorescence (TXRF): 10 µL of Ga 100 mg/L (Merck) was added as an internal standard to 1 mL of sample solution in an eppendorf tube, and it was stirred in Vortex; 5 µL of the solution was deposited on a quartz reflector and was measured for 300 seconds in the TXRFS2 Picofox spectrometer, with Mo tube, Bruker. As for soils, a 28 mm diameter tablet was made in an aluminum support in a PE-EL press with 3 g of dry and ground sample.
The elemental determination was carried out in the WDXRF S8 Tiger spectrometer, using the Quant Express application (Bruker).
To assess the mycorrhization level, subsamples of roots were stained with trypan blue (modified technique of Phillips and Hayman, 1970) and intraradical colonization by the AM fungus GA5 strain was checked.

Calculations

The frequency of mycorrhizal colonization was calculated as the percentage of root segments containing AM fungal structures. All measurements were taken under a Nikon light binocular microscope at 100x magnification.
The bioconcentration coefficient (BC) was calculated as the ratio between the concentration of metals in the plant tissue and in the soil (Eq.1), for both the aerial and radicular parts (BC_S and BC_R, respectively).

$$BC_{(S,R)} = \frac{C_{p(S,R)}}{C_{soil}} \qquad \text{Eq.1}$$

where:

$C_{p(S,R)}$: concentration of element in the aerial (shoots, S) or radicular (roots, R) plant tissue, ppm or %;
C_{soil}: concentration of element in soil, ppm or %.
Translocation factors (TF) were calculated as the ratio between the concentration of metals in the aerial part and in the roots (Eq. 2).

$$TF = \frac{C_{p(S)}}{C_{p(R)}} \quad \text{Eq.2}$$

where:
$C_{p(S)}$: concentration of element in the aerial plant tissue (shoots), ppm or %;
$C_{p(R)}$: concentration of element in the radicular plant tissue (roots), ppm or %.
BC and TF were calculated for the following elements: Fe, Ga, Mn.

The estimation of bioextracting potential of metals by VDM was calculated considering the concentration of elements in plant tissues observed at TRL-2, and the amount of biomass grown inside the VDM, as follows (Eq.3 and Eq. 4):

$$Extracting\ (g) = \frac{(W_{tot,S} \times C_{p(S)}) + (W_{tot,R} \times C_{p(R)})}{100} \quad \text{Eq.3}$$

where:
$W_{tot,S,R}$: Total weight of aerial (biomass shoots, S) and radical (biomass roots, R) plant tissue, g;
$C_{p(S,R)}$: percent concentration of element in the aerial (shoots, S) or radicular (roots, R) plant tissue, %.

$$Extracting\ (mg) = \frac{(W_{tot,S} \times C_{p(S)}) + (W_{tot,R} \times C_{p(R)})}{10^3} \quad \text{Eq.4}$$

where:
$W_{tot,S,R}$: Total weight of aerial (biomass shoots, S) and radical (biomass roots, R) plant tissue, g;
$C_{p(S,R)}$: concentration of element in the aerial (shoots, S) or radicular (roots, R) plant tissue, ppm.

RESULTS

Mapping and classification of mining wastes containing metals

In this research, one Sentinel-2A satellite data acquisition was carried out on the iron and manganese mining area on November 29th, 2017. For each site, the corresponding spectral signature was extracted by the image and the different spectral classes have been individuated by means of the interpretation of chemical and mineralogical analysis. Afterwards, the map of iron and manganese wastes was obtained through the spectral similarity measurements achieved by the principal supervised classifiers: the classifier used in this methodology was Spectral Angle Mapper (SAM) (Guglietta et al., 2020). The results of SAM classification were represented in an iron and manganese waste mining map that highlights waste deposit areas with different mean percentage of iron and manganese (Fig.4). In particular, the presence of vegetation in Class 1 indicates that the wastes have been accumulated over an extended period compared to Class 2, characterized by a steady accumulation of extractive wastes. Class 3 is very rich in iron and manganese but these deposits of residues are not of interest for the steel industry and need prior ore dressing. Finally, in Class 4 there are wastes with lower iron and manganese content.

Phyto-mycoremediation of mining wastes at TRL-2

The plants were kept in good condition until the end of the experiment at TRL-2. Average Fe, Mn and Ga concentrations in samples from pots containing contaminated and blank soils, as well as in biomass are reported in Table I, while $BC_{(S,R)}$ and TF are summarized in Table II. There was a marked difference in the three elements when we compared blank with contaminated soil; significant differences for Ga and Fe were also observed between soil contaminated with and without mycorrhization, while for Mn no differences were detected.

No differences in the metal concentrations in blank soil were observed in presence or absence of mycorrhizae (not shown in Table I). There were no significant differences between the total biomass grown in contaminated soil with and without mycorrhization (as for shoots, 0.231 and 0.241 g/specimen, respectively; as for roots, 0.0195 and 0.0198 g/specimen, respectively), while total biomass grown in blank samples with mychorrization was significantly higher than biomass grown in contaminated soil with mycorrhization (as for shoots, 0.347 and 0.231 g/specimen, respectively; as for roots, 0.114 and 0.0195 g/specimen, respectively).

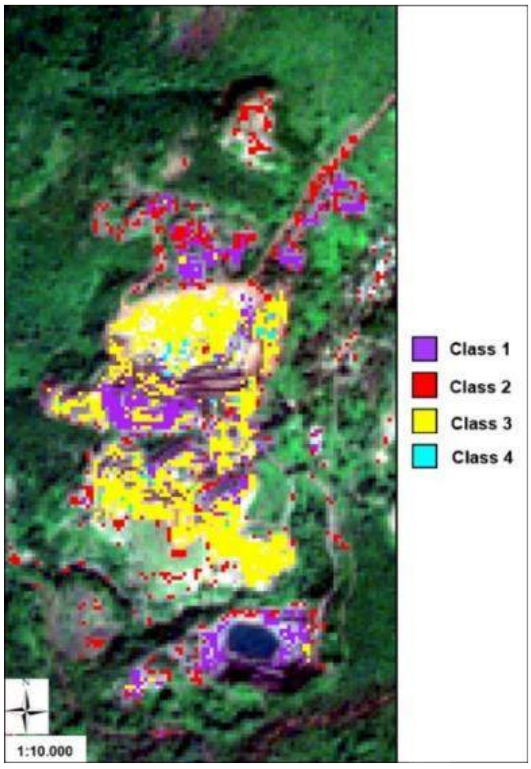


Figure 4. Spatial distribution of the mining waste classes overlaid on Sentinel-2A image (Guglietta et al., 2020).

Table I. Concentration of Mn, Fe and Ga in samples from pots containing contaminated soil (MA) and blank soil (B), as well as in biomass ($C_{p(S,R)}$), with and without mycorrhization.

Sample type	Sample ID	N	Mn (%)		Ga (ppm)		Fe (%)	
			Mean	SE*	Mean	SE	Mean	SE
Contaminated	MA^-	4	4.925	0.125	12.875	0.572	11.225	0.275
	MA^+	4	5.550	0.029	20.125	1.994	12.175	0.063
	$C_{p(S)}^+$	2	0.052	0.003	31.500	9.596	0.027	0.001
	$C_{p(S)}^-$	2	0.054	0.003	13.700	1.616	0.030	0.002
	$C_{p(R)}^+$	2	0.455	0.025	25.550	3.889	1.189	0.064
	$C_{p(R)}^-$	2	0.739	0.040	22.000	1.010	2.132	0.129
Blank	B^+	4	0.065	0.001	5.002	0.34	1.430	0.025
	$C_{p(S)}^+$	2	0.007	0.0007	3.02	0.745	0.012	0.0007
	$C_{p(R)}^+$	2	0.025	0.0014	3	0.099	0.22	0.014

* SE: standard error

 ISBN 978-987-1323-66-1

Table II: Average bioconcentration coefficient (BC) in shoots (S) and in roots (R) of plants grown on mycorrhized (+) and not mycorrhized (-) systems.

Sample ID	Parameter	Mn		Ga		Fe	
		Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE
MA^+	BC_S^+	0.0094	0.0006	1.5652	0.6319	0.0022	0.0001
	BC_R^+	0.0820	0.0048	1.2696	0.3191	0.0976	0.0058
	TF^+	0.1143	0.0128	1.2329	0.8076	0.0228	0.0025
MA^-	BC_S^-	0.0110	0.0009	1.0641	0.1728	0.0027	0.0002
	BC_R^-	0.1500	0.0119	1.7087	0.1544	0.1900	0.0161
	TF^-	0.0731	0.0079	0.6227	0.1574	0.0142	0.0017

The AM fungus *Rhizophagus intraradices* strain GA5 colonized sunflower roots in both MA^+ (5%) and B^+ (42%) treatments, respectively. Typical AM fungal structures were observed in sunflower roots with abundant vesicles and hyphae. No root colonization was observed in B^- and MA^- treatments, as expected (Fig. 5).

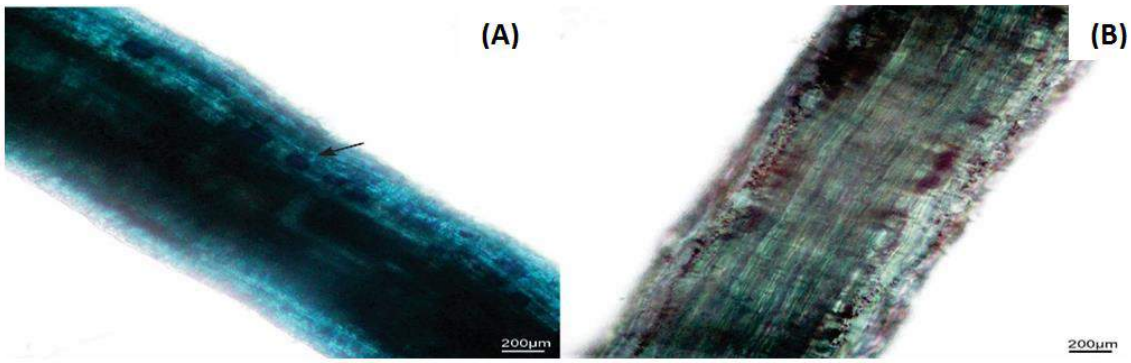


Figure 5. **(A)** Root colonization of sunflower plant by the AM fungus after 133 days. Detail of AM fungal structures are indicated by the arrow. **(B)** Uncolonized root of sunflower plant in control treatment (Guglietta et al., 2020).

The effect of mycorrhization was different for the elements under study: Mn and Fe were affected by decreasing their $BC_{(S,R)}$ and increasing their TF, while significant effects were not detected for Ga, as summarized in Table III.

Table III. Overall effect of arbuscular mycorrhizal colonization on BC_S, BC_R and TF, compared to control tests (not mycorrhized) (+, increase; -, decrease; =, no significant effect).

	Mn	Ga	Fe
BC_S	(-)	(=)	(-)
BC_R	(-)	(=)	(-)
TF	(+)	(=)	(+)

Estimation of bioextracting potential by VDM

The results achieved at TRL-2 were used to estimate the bioextracting potential of a VDM (TRL 6), in the perspective of its *on-site* application at Bichakundi mine site. Calculations for Mn, Fe and Ga are reported in Table IV, and expressed as per VDM unit. Total dry mass shoots (aerial) and roots collected from the VDM and used for calculations were 28,777 g and 4,317 g (respectively).

 ISBN 978-987-1323-66-1

Table IV. Estimated Mn, Fe and Ga extracting potential by phyto-mycoremediation in a VDM containing 1 m^3 of contaminated soil.

	Mn (%)(SD)	*Fe (%)(SD)*	*Ga (ppm)(SD)*
$C_{p(S)}^{+}$	0.052 (0.004)	0.03 (0.0007)	31.5 (13.4)
$C_{p(R)}^{+}$	0.46 (0.03)	1.19 (0.90)	25.55 (5.44)
Extracting g/VDM*	34.81	60.00	1.02

*since the VDM contained 1 m^3 of contamined soil, the calculation can be also expressed as per cubic meter of contaminated soil. SD: Standard Deviation.

DISCUSSION

The phyto-mycoremediation system showed good extraction capabilities, for the elements under study.

As for Ga, no differences in its accumulation in shoots and roots were found between mycorrhized and non mycorrhized plants. Jensen et al. (2018) showed that movement of Ga into the aboveground portions of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) was low (bioaccumulation factors of 0.0037 for Ga), concluding that the mobility of Ga in the soil - plant system is low compared to other common trace element contaminants. As far as we know, no information exist about Ga accumulation in sunflower plants colonized by AMF. Ga is chemically similar to Al, and several studies have indicated that AMF increased or did not affect Al accumulation in leaves and roots of host plants. Also, glomalin and the biosorption of fungal hyphae modulate interactions between plants and soil Al (Seguel et al., 2013).

As for Fe, mycorrhization led to a decrease in its accumulation in shoots and roots, and to an increase in TF. Data on the effect of mycorrhizal colonization on Fe concentration in plant tissues and on total plant Fe uptake are variable and inconsistent (Ferrol et al., 2016). Probably, external mycelium and glomalin in soil immobilized Fe ions as it was demonstrated by detection of abundant crystal-like aggregates present on the mucilaginous outer hyphal wall layers of AMF (Gonzalez-Chavez et al., 2002). It was demonstrated that Fe elements accumulated at the hyphosphere to enhance the nutrient absorption by hyphae, as Ca ions performance (Xu et al., 2018). Fe was translocated more efficiently to aerial parts when *R. intraradices* was present.

As for Mn, it is recognized as an essential micronutrient, an activator of a number of enzymes involved in the tricarboxylic acid cycle, and aids the synthesis of chlorophyll (Ducic and Polle, 2005; Lyu et al., 2017). The uptake of Mn has repeatedly been found to be lower in mycorrhizal plants (Corrêa et al., 2014). The negative effect of AM on Mn accumulation in biomass shoots and roots, compared with non-mycorrhized plants, has been attributed to a shift in the composition and activity of rhizosphere microorganisms caused by inoculation with AM which decreased the abundance of Mn reducers (Ferrol et al., 2016). Our results also demonstrated that translocation was higher in presence of AM.

CONCLUSION

Preliminary results show that it is possible to obtain the growth of the mycorrhizal assisted sunflowers in areas classified by remote sensing as Class 1, 2, 3 and 4. Despite such promising results, it must be noticed that overall biomass growth at TRL-2 was not sufficient

to sustain a significant recovery of raw and critical raw materials at this stage, therefore process conditions (i.e., light exposure, temperature, etc.) must be optimized. It is important to monitor pH and Eh (BS ISO 11271:2002) values at various depths of soil, in order to relate the solubilization of the elements with their bioaccumulation. The simulation of its application at TRL-6 (i.e., in a VDM) also yielded interesting results: the predicted Mn, Fe and Ga uptake was 34.81 g, 60 g and 1.02 g per cubic meter of contaminated soil, respectively. Results are encouraging and the application of such multidisciplinary approach can be important to develop a circular model for sustainable exploitation of mining residues.

REFERENCES

Babel, S., and Opiso, E. M. Removal of Cr from synthetic wastewater by sorption into volcanic ash soil. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 4(1), 99–107 (2007).

Barbosa Castanheira Ferrara, B., Chaves Silva, S., Ricon de Oliveira, R., and Chalfun, Jr. A. Zinc supply impacts on the relative expression of a metallothionein-like gene in Coffea arabica plants. *Plant Soil.* 411(1–2), 179–91 (2017).

Bompadre, M. J., Silvani, V. A., Fernández Bidondo, L., Ríos de Molina, M. C., Colombo, R., Pardo, A. G., and Godeas, A. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate oxidative stress in pomegranate plants growing under different irrigation conditions. *Botany* 92(3), 187–93 (2014).

Correa, A., Cruz, C., Pérez-Tienda, J., and Ferrol, N. Shedding light onto nutrient responses of arbuscular mycorrhizal plants: nutrient interactions may lead to unpredicted outcomes of the symbiosis. *Plant Science* 221–222, 29–41 (2014).

Ducic, T., and Polle, A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants *Braz. J. Plant Physiol.* 17:1, 103-112 (2005).

Ferrol, N., Tamayo, E., and Vargas, P. The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *J. Experimental Botany* 67(22), 6253–6265 (2016).

Glick, B. R. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv.* 21, 383–393 (2003).

Gohre, V., and Paszkowski, U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta* 223(6), 1115–1122 (2006).

Gonzalez-Chavez, C., D'Haen, J., Vangronsveld, J., and Dodd, J. C. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of different Glomus spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil* 240, 287–297 (2002).

Guglietta, D., Belardi, G., Cappai, G., Casentini, B., Godeas, A., Milia, S., Passeri, D., Salvatori, R., Scotti, A., Silvani, V., Tempesta, E., Ubaldini, S., and Trapasso, F. Toward a multidisciplinary strategy for the classification and reuse of iron and manganese mining wastes. *Chem. J. Mold. 15*(1), 21-30 (2020).

Ibañez de Aldecoa Quintana, J. M. Niveles de madurez de la tecnología [Technology readiness levels: TRLS]: Una introducción. *Econ. Indus.* 393, 165–171 (2014).

Jensen, H., Gaw, S., Lehto, N. J., Hassall, L., and Robinson, B. H. The mobility and plant uptake of gallium and indium, two emerging contaminants associated with electronic waste and other sources. *Chemosphere* 209, 675-684 (2018).

Kadlec, R. H., Knight, R. L., Vymazal, J., Brix, H., and Cooper, P. Constructed Wetlands for Pollution Control. London(UK): IWA Publishing (2000).

Ker, K., and Charest, C. Nickel remediation by AM colonized sunflower. *Mycorrhiza* 20, 399–406 (2010).

Lanfranco, L., Bolchi, A., Ros, E. C., Ottonello, S., and Bonfante, P. Differential Expression of a Metallothionein Gene during the Presymbiotic versus the Symbiotic Phase of an Arbuscular Mycorrhizal Fungus. *Plant. Physiol.* 130(1), 58-67 (2002).

Lenoir, I., Fontaine, J., and Lounès-Hadj Sahraoui, A. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. *Phytochem.* 123, 4–15 (2016).

Lyu, S., Wei, X., Chen, J., Wang, C., Wang, X., and Pan, D. Titanium as a Beneficial Element for Crop Production. *Front. Plant Sci.* 8:597 (2017).

Madera-Parra, C. A. Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants. *Ing. Comptet.* 18(2), 183–192 (2016).

Mena, J., Rodríguez, L., Núñez, J., Fernández, F. J., and Villaseñor, J. Design of horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands treating industrial wastewaters. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 111, 555–64 (2008).

Phillips, J.M., and Hayman, D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55, 158-160 (1970).

Rivelli, A. R., De Maria, S., Puschenreiter, M., and Gherbin, P. Accumulation of cadmium, zinc, and copper by Helianthus annuus L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements. *Int. J. Phytoremediation* 14(4), 320–34 (2012).

Scotti, A., Godeas, A., Silvani, V., and Tomellini, G. Biorremediación: simbiosis *Helianthus annuus-Glomus intraradices* en la captación de Zn, Mn, Sr y U, en sustratos preparados con cenizas volcánicas del complejo planchón-peteroa. En Actas E-ICES7, page 92 (2011). http://www.uncuyo.edu.ar/ices/upload/libro-de-resumen-eices-7.pdf

Scotti, A., Godeas, A., and Silvani, V. inventors; National Atomic Energy Commission, University of Buenos Aires, assignees. 2013. Sistema biorremediador para tratamiento de suelo y/o aguas contaminadas. Argentina Patent 130100620. Boletín Oficial p. 58.

Scotti, A., Silvani, V., Cerioni, J., Visciglia, M., Benavidez, M., and Godeas, A. Pilot testing of a bioremediation system of water and soils contaminated with heavy metals: Vegetable Depuration Module. *Int. J. Phytoremediation*. 21(9), 899-907 (2019).

Seguel, A., Cumming, J. R., Klugh-Stewart, K., Cornejo, P., and Borie, F. The role of arbuscular mycorrhizas in decreasing aluminium phytotoxicity in acidic soils: a review. *Mycorrhiza* 23, 167–183 (2013).

Silvani, V. A., Fernández Bidondo, L., Bompadre, M. J., Pérgola, M., Bompadre, A., Fracchia, S., and Godeas, A. M. Growth dynamics of geographically different arbuscular mycorrhizal fungal isolates belonging to the 'Rhizophagus clade' under monoxenic conditions. *Mycologia* 106(5), 963–975 (2014).

Smith, S. E., and Read, D. J. Mycorrhizal symbiosis. 3rd ed. New York: Academic Press. (2008).

Xu, L.-J., Hao, Z.-P., Xie, W., Li F., and Chen B.-D. Transmembrane H^+ and Ca^{2+} fluxes through extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi in response to drought stress. *Chin. J. Plan. Ecolo.* 42(7), 764-773 (2018).

Yang, Y., Liang, Y., Han, X., Chiu, T. Y., Ghosh, A., Chen, H., and Tang, M. The roles of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in phytoremediation and tree-herb interactions in Pb contaminated soil. *Sci. Rep.* 6, 20469 (2016).

EVOLUCIÓN DE LOS MANANTIALES DEL DISTRITO VICHIGASTA, LA RIOJA, ARGENTINA.

Silva S. H.[a], Rodríguez. C. I.[b] Miguel R. E.[c]

[a]*Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales. Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Consejo Nacional de Investigaciónes Científicas y Técnicas. ARGENTINA*
[c]*Centro Regional Catamarca-La Rioja, Estacion Experimental Agropecuaria Chilecito, Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, ARGENTINA*

e-mail: silvasantiago2103@gmail.com

RESUMEN

La provincia de La Rioja se caracteriza por la amplia presencia de zonas áridas y semiáridas producto de un marcado y continuo estrés hídrico. Sin embargo, su geomorfología accidentada permite el desarrollo de cuencas que almacenan importantes volúmenes de agua subterránea como es el caso de la cuenca Antinaco-Los Colorados donde se localiza hacia su Centro-Oeste el distrito de riego y localidad de Vichigasta. En esta localidad una importante dislocación en sentido NNO-SSE generó una escarpa de falla o "bordo", donde el recurso hídrico subterráneo se manifiesta en manantiales enterrados. Para la captación del agua, los agricultores del distrito cavan drenes horizontales para el riego de predios privados y la conducción por canales de riego comunal. El objetivo de este documento es analizar y describir la hidrogeología de manantiales en el Distrito Vichigasta y evaluar posibles impactos de las actividades antrópicas en su hidrodinámica. Como metodología se recopiló información antecedente del medio físico-natural, como geología, geomorfología, hidrología, hidrogeología y clima. Mediante salidas de campo se identificaron 35 manantiales, se aforaron y caracterizaron físico-químicamente en campo (pH, temperatura y conductividad eléctrica) a fin de comparar la situación actual con estudios antecedentes del año 1961. Los resultados indican una merma general de los caudales erogados e inclusive el agotamiento de 15 manantiales. Un análisis especial se efectuó con el manantial Comunidad de Barrio Chima, el cual disminuyó consideradamente con respecto a los datos antecedentes (≈ 44%) con un incremento en la conductividad eléctrica (≈ 60%), lo que indica posibles impactos derivados de la instalación de pozos de bombeo aguas arriba. Se considera que, ante la merma de caudales registrada y cambios hidroquímicos, cualquier emprendimiento que se desarrolle por encima de la línea de bordos (aguas arriba de los manantiales) impactará directamente sobre la cantidad y calidad del recurso hídrico comprometiendo la captación y disponibilidad de agua para los agricultores tradicionales.

Palabras Clave: Recurso Hídrico, Manantiales, Hidrogeología, Hidroquímica

INTRODUCCIÓN

El Distrito de Vichigasta se emplaza dentro del valle central de la Cuenca Antinaco-Los Colorados, la cual se desarrolla en el centro de la Provincia de la Rioja, con una orientación NNO-SSE "ver Fig 1". Esta cuenca presenta una superficie de 8.200 km^2 y pertenece a la Región Hidrogeológica de Sierras Pampeanas y sus Valles. Sus límites se hallan entre las Sierras del Famatina al Oeste y las Sierras del Velasco en el Este, el

límite Norte se da en la localidad de Pituil, donde se observa un marcado cambio de la pendiente, mientras que el límite Sur ocurre en Los Colorados donde una falla generó un levantamiento o cierre hidrogeológico al flujo de agua (Sosic, M. 1971).
Entre las principales características de esta cuenca se presentan escasas precipitaciones y alta evapotranspiración lo que conlleva un marcado y continuo déficit hídrico. Sin embargo, el fondo del valle se encuentra recubierto por grandes depósitos aluviales en los que se desarrollan grandes depósitos de aguas subterráneas que se recargan a través de un complejo sistema de fallas y diaclasas (Miguel, R. E., y Gareis, M. C. 2017).

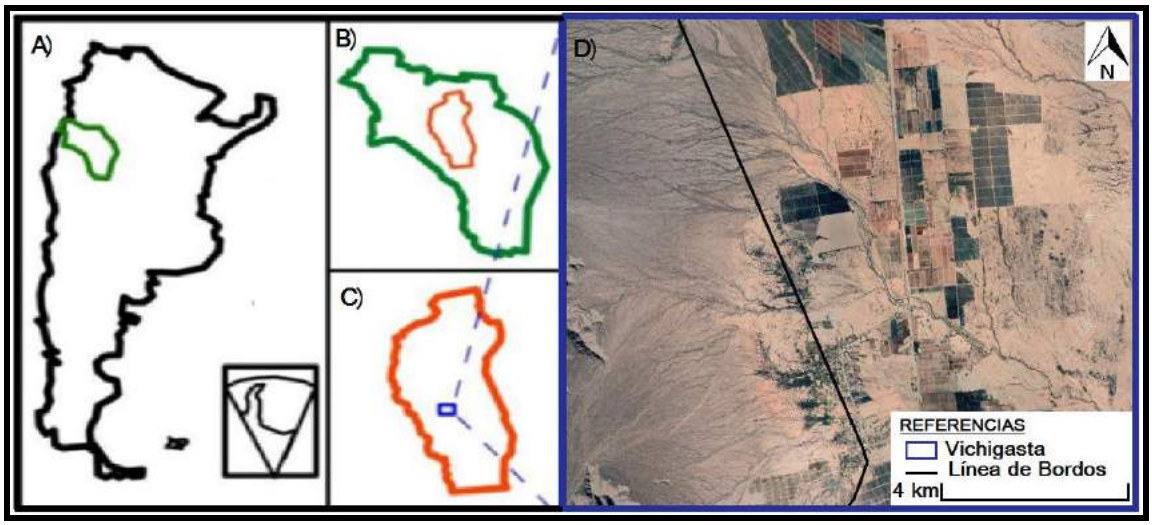


Figura 1. Localización del área de estudio; **a)** Provincia de la Rioja en Argentina; **b)** Cuenca Antinaco-Los Colorados (CALC) en Provincia de La Rioja; **c)** CALC y zona de Vichigasta; **d)** Línea de Bordos.

A unos 40 km al Sur de la ciudad de Chilecito se localiza el Distrito de Vichigasta donde una importante dislocación en sentido NNO-SSE generó una escarpa de falla o "bordo". En el límite oriental de este afloramiento el recurso hídrico subterráneo se manifiesta en manantiales donde los pobladores tradicionales y actuales productores efectúan obras de captación y conducción para abastecer sus fincas con los volúmenes de agua necesarios para su producción, siendo este recurso la principal fuente de agua que sustenta la actividad productiva de pequeños productores y la agricultura familiar.
El sistema acuífero localizado al Oeste de Vichigasta ha sido poco estudiado y son nulas las publicaciones disponibles sobre la geometría del reservorio, su hidrodinámica e hidroquímica, situación que no permite conocer detalladamente el estado del sistema hídrico, ni establecer su evolución. Aun así, se destacan los trabajos de Sosic, M. 1971 donde efectuó un aforo puntual de los manantiales en el año 1961 y se advierte la falta de información con respecto al recurso hídrico subterráneo de la región, y Miguel et al. 2018, donde se establece una merma en los caudales erogados en los principales manantiales comunales y prioriza la necesidad de realizar estudios de detalle sobre las características hidrogeológicas, así como también de seguimiento y monitoreo del recurso.
En este contexto sumado a la preocupación manifiesta de los productores por atravesar largos periodos de sequía principalmente en época estival, es que esta investigación busca analizar y describir la hidrogeología de manantiales en el Distrito Vichigasta y evaluar posibles impactos de las actividades antrópicas en su hidrodinámica.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la consecución del objetivo planteado en el presente trabajo, se utilizaron distintas estrategias metodológicas, instrumentos y materiales.
Como primera instancia, se realizó la búsqueda de información antecedente en relación al subsistema físico-natural abarcando: cartas topográficas, datos geológicos e hidrológicos, climáticos, geomorfológicos e hidrogeológicos.
A su vez, se coordinó junto con referentes locales el recorrido del área de estudio, identificando manantiales públicos y privados relevados por Sosic, M. 1971 y se registraron sus ubicaciones en GPS Garmin eTrex 20x bajo coordenadas en grados decimales. Paralelamente en cada punto de aforo se estimaron los caudales erogados desde enero a mayo del año 2019, para ello fue necesario utilizar tres métodos de aforo: 1) En canales con velocidades superiores a 0,1 m seg-1 y más de 0,035 m de altura se aforó mediante correntómetro de hélices Global Water FP111. 2) En manantiales donde la velocidad del flujo era menor a 0,1 m seg-1 y/o menos a 0,035 m de altura, el cálculo de la velocidad se realizó con un flotador de superficie multiplicado por un coeficiente de corrección (0,8). 3) Cuando las condiciones del canal o del área no permitían el uso de los métodos anteriores se optó por la medición volumétrica, registrando el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido. A su vez, durante cada aforo se realizó una caracterización química básica de campo con la medición in situ de temperatura (^{0}C), pH y conductividad eléctrica (µS cm^{-1}). Para ello, se utilizó un equipo multiparamétrico Hanna 9811-5 el cual se calibró con soluciones específicas antes de cada salida. La totalidad de los datos de caudal presentados corresponde sólo al período estival del año 2019, época donde se desarrollan las actividades vinculadas a la producción y el riego, dándose en esta época según sus pobladores el mayor déficit hídrico. Por otra parte, se identificaron informantes claves a los cuales se les realizaron entrevistas semiestructuradas, relevándose información cuali-cuantitativa sobre las principales problemáticas asociadas a los manantiales en el Distrito de Vichigasta. A su vez, se prestó especial atención al contexto de cada manantial, principalmente las actividades realizadas en las cercanías (plantaciones, ladrilleras, industrias, pozos de bombeo, etc.), registrándose todo a través de fotografías.
La integración de la información permitió determinar y evaluar posibles impactos de las actividades antrópicas en la hidrodinámica de los manantiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidrogeología de Manantiales

La cuenca Antinaco-Los Colorados se caracteriza por un clima árido a semiárido, donde las precipitaciones son escasas, irregulares y estacionales, con dos épocas diferenciadas, la estival lluviosa y la invernal seca. Sin embargo, la localidad de Vichigasta no presenta registros meteorológicos o pluviómetros que permitan determinar la precipitación efectiva por lo cual, la Estación Experimental Agropecuaria INTA-Chilecito recopiló datos de trabajos antecedentes y estaciones meteorológicas cercanas (en un radio de 40 km dentro del valle) estimando una precipitación media anual de 219-183 mm para los años 1960-1961 y de 232-230 mm para el año 2018- 2019

respectivamente, siendo estos años de interés para la presente investigación[1]. No existe un valor antecedente de evapotranspiración general en la cuenca, aunque en el valle la evapotranspiración potencial varía entre 977 y 1.193 mm, lo que determina un déficit hídrico a lo largo de todo el año (Costa, M. C., y Minetti, J. L. 2001). Dentro del distrito de Vichigasta, se aprecia una geomorfología accidentada derivada de procesos tectónicos, donde las dislocaciones asociadas a fallas originaron afloramientos del cuaternario inferior, asentados sobre un nivel base impermeable perteneciente a la Cuenca de Paganzo (Azcuy et al., 1987), dando como resultado escarpas de fallas conocidas como "bordos". Estos se desarrollan con una orientación NNO-SSE a lo largo de unos 12 km, desde inmediaciones de la Estancia Ishanca hasta el Barrio Chima en la localidad de Vichigasta, con variaciones altitudinales entre 970 y 870 m.s.n.m. "ver Fig 2 y 3".



Figura 2. Escarpa de falla conocida localmente como "bordo".

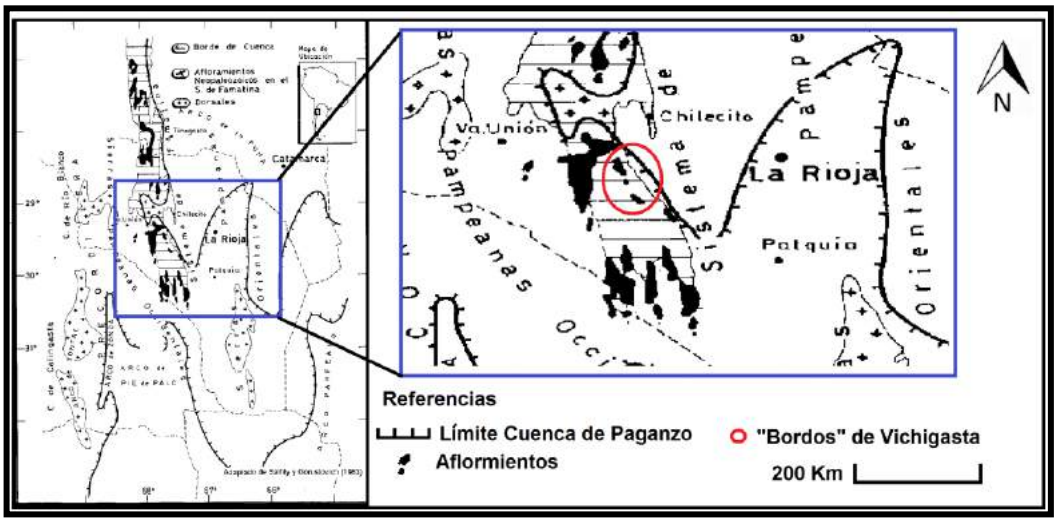


Figura 3. Afloramientos del cuaternario inferior dentro de la Cuenca de Paganzo. Adaptado de Salfity, J. A., y Gorustovich, S. A. 1983.

[1] Datos inéditos sistematizados por Miguel, R.E. 2020 en Estación Meteorológica Automática de INTA Estación Experimental Agropecuaria Chilecito.

Según Sosic, M. 1971, desde Famatina hasta Vichigasta se distinguen los afloramientos de fanglomerados de un antiguo cono de deyección, a los que se les puede atribuir edades plio-pleistocenicas. Estos se hallan en posiciones discordantes sobre elementos antiguos, en este caso del terciario y en ocasiones se encuentran cubiertos por elementos discordantes modernos. Dentro del Distrito se presenta una cubierta sedimentaria denominada como formación Santa Florentina, también conocida como primer nivel de pie de monte. El perfil tipo de esta formación presenta rodados medianos a gruesos pudiendo alcanzar 0,7 metros de diámetro, intercalados con bancos de gravilla o grava gruesa. La selección, consolidación y estratificación es pobre donde los clastos se componen de rocas ígneas y metamórficas del basamento.

En los bordos de Vichigasta la formación se presenta como una facie distal compuesta por rodados y arenas gruesas con intercalaciones limoarcillosas y arenas arcósicas castaño rojizas producto de la desintegración mecánica de rocas graníticas. A su vez presenta buzamientos tectónicos de unos 15^0 al Oeste.

En cuanto a la hidrogeología del área, el agua que proviene del abanico aluvial de la Sierra de Sañogasta, infiltra y se acumula sobre Estratos de Paganzo, Piso II (niveles impermeables) "ver Fig 4", los cuales están inclinados en dirección contraria a la circulación del agua, provocando que la misma circule a través de un paleorrelieve debido a la dislocación regional, y aflore originando manantiales a lo largo de la falla (Sosic, 1971) "ver Fig 5".



Figura 4. Afloramiento de Estrato de Paganzo Piso II.

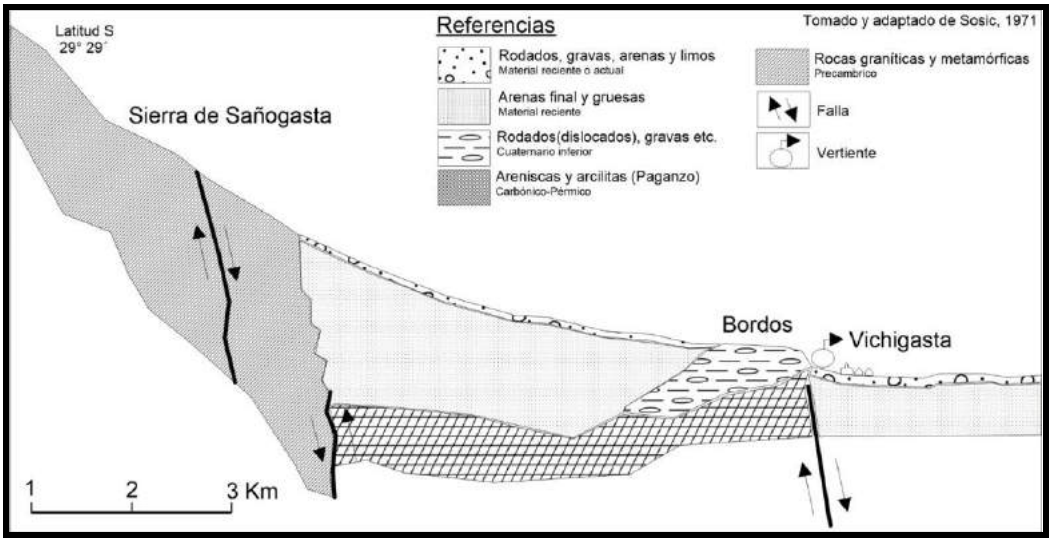


Figura 5. Perfil geológico del abanico aluvial de Vichigasta. Elaborado por Miguel et al. (2018).

Los manantiales en el área son de tipo hiprocreno según la categorización de Springer, A.E.; y Stevens, L.E. 2009, es decir, presentan niveles de agua subterránea que se aproximan, pero no alcanzan la superficie. La descarga de estos manantiales es lo suficientemente baja por lo que se puede evapotranspirar en su totalidad y no presentar una expresión superficial del agua, por lo cual, para su aprovechamiento los pobladores realizan drenes horizontales desde la superficie hasta y debajo del nivel freático, obteniendo así un flujo de agua que satisfaga la demanda de los cultivos y hectáreas implantadas "ver Fig 6". Debido a esta marcada explotación aguas abajo del área de los manantiales se evidencian procesos de profundización de niveles estáticos y perdida de reservas de agua subterránea (Miguel et al, 2018). No obstante, por su localización estas extracciones no afectarían la dinámica de los manantiales. Sin embargo, cabe aclarar que aguas arriba y en sus inmediaciones, se han desarrollado en los últimos años pozos de extracción para abastecimiento poblacional y riego que podrían impactar sobre el volumen y calidad del agua manada.

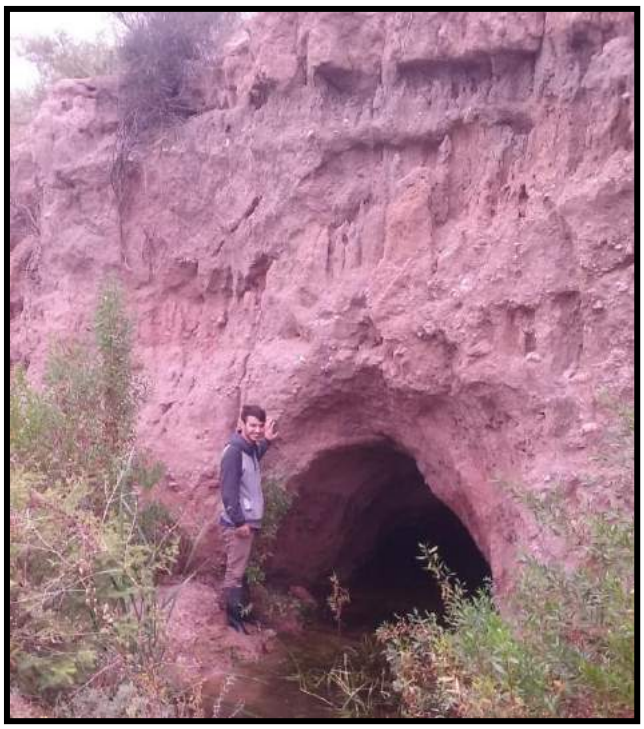


Figura 6. Dren horizontal de Manantial Luna.

Evolución de manantiales

A partir de la visita y recorrido del área de estudio, se localizaron los 30 manantiales relevados por Sosic en el año 1961 y 5 manantiales nuevos. En la Tabla I se presentan el aforo de (Sosic, M. 1971) y los caudales medios (l seg^{-1}), aforados para el periodo Enero-Mayo de 2019. Con esta información se cuantificaron los cambios de la descarga en el área de bordos.

Tabla I. Comparación de caudales erogados por los manantiales entre 1961 y 2019

Nº de Orden	Área	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud	Q (l seg $^{-1}$) 1961	Q (l seg^{1}) Enero-Mayo 2019
1	Patayaco	-29.461589^{0}	-67.515624^{0}	0,63	Abandonado
2	"	ND	ND	0,09	ND
3	"	-29.463603^{0}	-67.511760^{0}	4	1,38
4	"	-29.465931^{0}	-67.514464^{0}	1,75	2,5
5	"	-29.467617^{0}	-67.515299^{0}	0,4	0,33
6	"	ND	ND	1,26	Agotado
7	"	-29.468282^{0}	-67.515634^{0}	0,31	ND
8	"	-29.472417^{0}	-67.515437^{0}	Trabajos de captación	0,02
9	B. La Plaza	-29.486985^{0}	-67.515268^{0}	24	2,83
10	B. La Plaza	-29.486994^{0}	-67.512070^{0}	1,5	25,8
11	"	-29.486736^{0}	-67.511578^{0}	11,24	0,74
12	"	-29.488305^{0}	-67.511623^{0}	7,15	1,84
13	"	-29.488882^{0}	-67.512042^{0}	0,31	Agotado
14	"	-29.489417^{0}	-67.512071^{0}	0,31	Agotado
15	"	-29.491147^{0}	-67.511251^{0}	2,5	1,105
16	"	-29.492351^{0}	-67.510523^{0}	1,2	0,11
17	"	-29.492866^{0}	-67.509104^{0}	0,63	0,26
18	"	ND	ND	1	Agotado
19	"	ND	ND	Trabajos de captación	Agotado
20	"	ND	ND	0,12	Agotado
21	B. Chima	-29.495673^{0}	-67.508619^{0}	2,111	Agotado
22	"	ND	ND	0,12	Agotado
23	"	-29.496499^{0}	-67.507589^{0}	2	0,14
24	"	ND	ND	1	Agotado
25	"	-29.499420^{0}	-67.504703^{0}	1,5	Agotado
26	"	-29.465195^{0}	-67.514018^{0}	1,26	0,02
27	"	-29.500897^{0}	-67.504894^{0}	No se pudo aforar	ND
28	"	-29.502050^{0}	-67.504257^{0}	0,89	0,21
29	"	-29.502649^{0}	-67.504740^{0}	1,26	Abandonado
30	"	-29.502194^{0}	-67.503952^{0}	15	6,69
Nuevos Manantiales					
31	B. La Plaza	-29.48159^{0}	-67.51679^{0}	ND	0,21
32		-29.482621^{0}	-67.516334^{0}	ND	0,12
33	Patayaco	-29.465191^{0}	-67.513887^{0}	ND	0,14
34	"	-29.419987^{0}	-67.545268^{0}	ND	0,17
35	"	-29.419749^{0}	-67.544988^{0}	ND	0,19
	Q total (l seg $^{-1}$)			**83,54**	**44,8**

Al comparar los caudales manados por los manantiales para ambos años, se observa una disminución de 38,74 l seg^{-1} en la totalidad del área, lo que equivale aproximadamente al 46% del caudal aforado para el año 1961. Esto se evidencia con el 50% de los manantiales abandonados o agotados.

Por otra parte, se estableció el límite de la cuenca que a priori alimenta la zona de los manantiales de Vichigasta efectuando su cierre donde se encontraría la falla, alcanzando así un área de 294 km^{2} "ver Fig 7". Considerando el promedio de la precipitación media para los años 1960-1961 (201mm) en base a Costa, M. C., y Minetti, J. L (2001), el total de agua precipitada en el área sería de 59,09 hm^{3} año^{-1}. Utilizando el criterio planteado

 ISBN 978-987-1323-66-1

por Sosic para la cuenca, en donde un 10 % de lo precipitado recarga el acuífero, se obtiene una recarga de 5,90 hm^3 $año^{-1}$, lo que equivale a una descarga potencial en el área de falla de alrededor de 187 l seg^{-1}, aplicando la misma fórmula para los años 2018-2019 con un promedio de precipitación media de 231 mm se obtiene un valor de recarga de 6,79 hm^3 $año^{-1}$ y una descarga potencial de 215 l seg^{-1}.

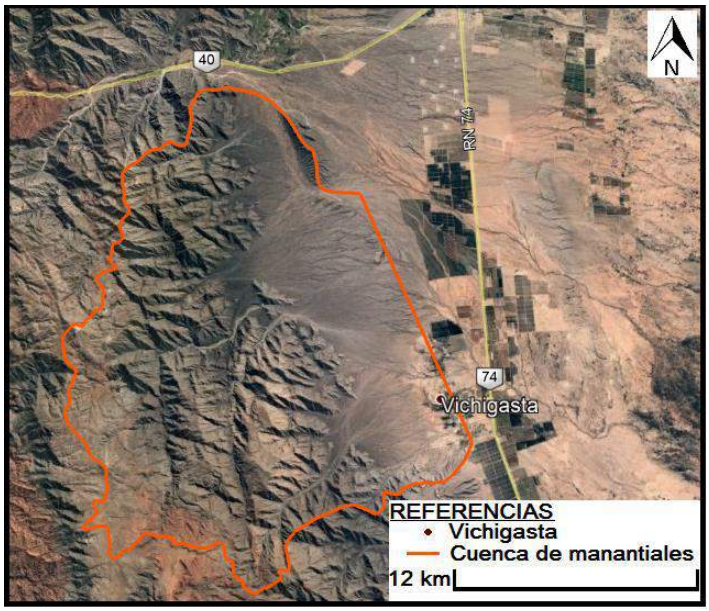


Figura 7. Cuenca de recarga de manantiales de la localidad de Vichigasta.

Si bien la caracterización físico-química de los manantiales es similar en la mayor parte de la localidad con temperaturas medias de 22,8 ºC y pH medio de 7,6. Se observó un aumento en la conductividad eléctrica hacia el Suroeste del área (Comunidad de Barrio Chima), con valores de 1040 µS cm^{-1} que duplican los valores medios medidos en el resto de los manantiales (497,5±144,5). Este aumento en la conductividad eléctrica se asocia a sectores donde se han desarrollado pozos de bombeo para abastecimiento poblacional y riego “Ver Fig 8”.

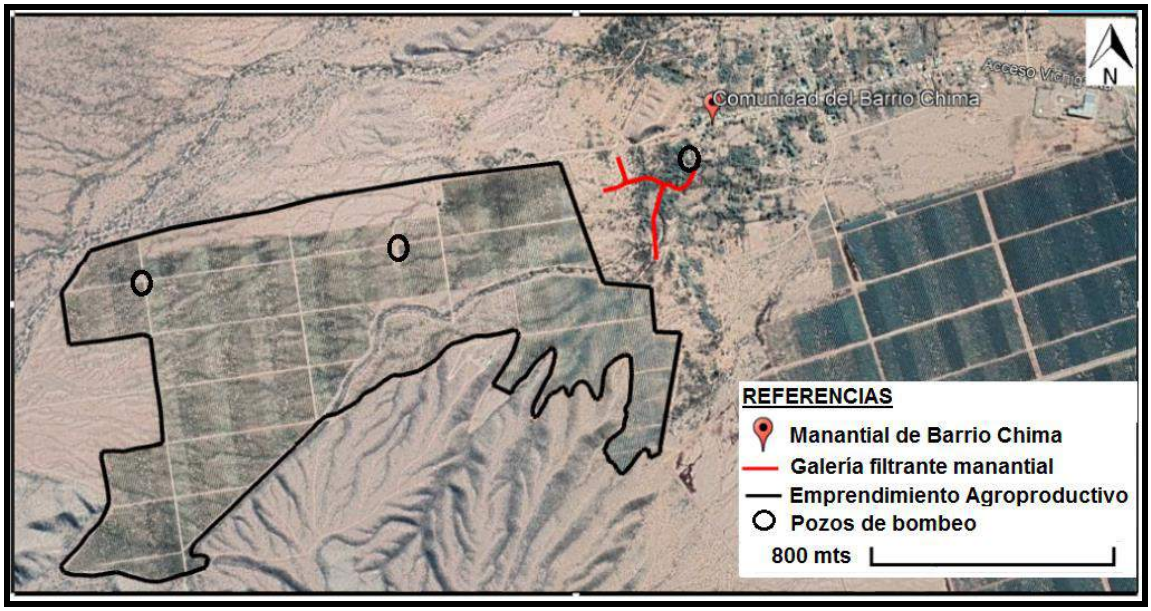


Figura 8. Actividades antrópicas aguas arriba del área de captación comunal del Barrio Chima.

Al unificar los datos relevados en el trabajo antecedente que demuestra la disminución de los caudales erogados por los manantiales en este sector y el aumento de la conductividad eléctrica desde el año 2015 a 2018 (Miguel et al., 2018) y los cuatro (4) meses de medición semanal realizados en el año 2019, se pone de manifiesto una potencial influencia de la explotación de agua subterránea en los caudales erogados y en el aumento de la conductividad eléctrica en el agua.
En la Figura 9, se presenta la evolución de caudales y la conductividad eléctrica en el manantial de la Comunidad de Barrio Chima desde Julio de 2015 a Abril de 2019 donde se observa la reducción de los caudales y el aumento de la conductividad eléctrica.



Figura 9. Caudal y conductividad eléctrica 2015-2019
Datos tomados y sistematizados por INTA EEA Chilecito.

De esta manera se evidencian los impactos de las actividades antrópicas en el volumen y calidad del agua manada por el manantial de Barrio Chima, ampliamente diferenciada del resto de los manantiales. Dichos impactos no solo afectan al sistema hídrico aisladamente, sino al conjunto del sistema ambiental, identificándose procesos de salinización del suelo y una menor disponibilidad de agua para riego de los pequeños productores “ver Fig 10”.

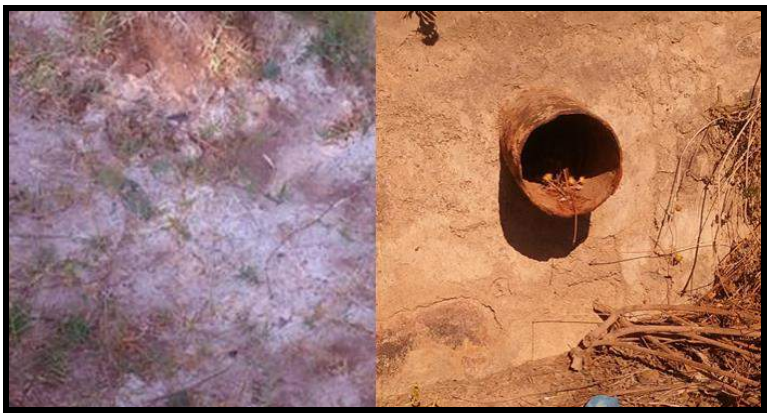


Figura 10. Concreciones salinas en suelo y estanques abandonados.

CONCLUSIONES

Se advierte en el distrito de Vichigasta una reducción del 46% de los caudales manados por los manantiales comparando el aforo puntual del año 1961 con el año 2019 con la desaparición del 50% de los manantiales. En adición se observa la afectación en cantidad y calidad del agua erogada por el Barrio de la Comunidad del Barrio Chima debido al desarrollo aguas arriba y en sus inmediaciones de pozos de bombeo situación que afecta la capacidad de producción de pequeños productores agrícolas.

Sin embargo, el conocimiento hidrogeológico en la región es limitado, por lo que resulta necesario avanzar en estudios de detalle para conocer las dimensiones del sistema, su hidrodinámica y el volumen de reserva. De esta manera se generará un balance hidrológico más acabado y se podrá elaborar un conjunto de pautas de manejo que permitan tender hacia el desarrollo de una gestión integral del recurso hídrico.

No obstante, cualquier acción que capte y/o utilice el recurso hídrico agua arriba de la escarpa de falla impactara directamente sobre la cantidad y calidad de agua manada por los manantiales comprometiendo al sistema ambiental. En tal sentido, resulta relevante la reglamentación de la Ley Provincial 8.790 (Reserva Provincial de Uso Múltiple) que tiene por finalidad proveer de pasturas al ganado de los pequeños productores de la zona y proteger la reserva acuífera destinada a abastecimiento poblacional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se realizó dentro de un convenio de comisión de estudios, celebrado entre la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, desarrollado entre los meses de Enero y Abril del año 2019 en la Estación Experimental Agropecuaria Chilecito.

Se agradece al Proyecto Estructural INTA 041 2018-2022 “Aportes a la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas del sistema agroalimentario argentino”.

REFERENCIAS

Azcuy, C. L., Andreis, R. R., Cuerda, A., Hünicken, M. A., Pensa, M. V., Valencio, D. A., y Leguizamón, R. R. (1987). Cuenca Paganzo. El Sistema Carbonífero en la República Argentina. Academia Nacional de Ciencias, 3, 41-100.

Costa, M. C., y Minetti, J. L. (2001). El agua: una limitante de la agricultura en La Rioja. Avances en la producción vegetal del NOA (1998-2001).

Miguel, R. E., y Gareis, M. C. (2017). Ampliación de la frontera agrícola e industrial en la Cuenca Antinaco–Los Colorados, La Rioja. Su implicancia en el recurso hídrico y en la energía. Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes, 7(2), 1-11.

Miguel, R.E.; González, J.V.; Vuksinic, E.; Agüero Alcaras, L.M. (2018). Evolución de las vertientes para uso de riego comunal en Vichigasta, La Rioja. II Jornadas Internacionales y IV Nacionales de Ambiente. 17, 18 y 19 de octubre de 2018. Tandil, Buenos Aires.

Salfity, J. A., y Gorustovich, S. A. (1983). Paleogeografía de la cuenca del Grupo Paganzo (Paleozoico superior). Revista de la Asociación Geológica Argentina, 38 (3-4), 437-453.

Sosic, M. (1971). Descripción hidrogeológica del Valle de Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja. Buenos Aires. Ministerio de Industria, Comercio y Mineria, Subsecretaria de Mineria, Dirección Nacional de Geología y Minería.

Springer, A.E.; Stevens,L.E. (2009). Spheres of discharge of springs. Hydrogeology Journal. 17: 83–93.

CARACTERIZACION HIDROQUÍMICA PRELIMINAR DEL AGUA UTILIZADA PARA CONSUMO EN EL BALNEARIO MARISOL, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Stein M. J.[a], Borzi G.[ab], Tanjal C.[ab] y Di Lello C.[ab]

[a]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, FCNyM, Universidad Nacional de la Plata, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigaciones Geológicas, CIG, CONICET-UNLP, ARGENTINA*

e-mail: stein.fina@gmail.com

RESUMEN

La disponibilidad de agua potable en cantidad y calidad es una de las mayores limitaciones para un buen desarrollo urbano. El Balneario Marisol, ubicado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, es la única villa balnearia turística del partido de Coronel Dorrego. En esta localidad, el abastecimiento de agua se realiza mediante perforaciones domiciliarias, el cual puede verse afectado mayormente en los meses de verano debido a un considerable aumento de la población del turismo. En ese sentido, y ante la escasez de estudios en el área en referencia a la calidad química del agua subterránea para consumo, es que el objetivo del presente trabajo fue realizar una caracterización hidroquímica del agua utilizada para consumo del Balneario Marisol. Para esto se tomaron 21 muestras de agua subterránea pertenecientes a pozos de abastecimiento de los pobladores locales, en las cuales se midieron el pH y la conductividad eléctrica del agua y se determinó el contenido de elementos mayoritarios mediante métodos estandarizados. Los resultados preliminares indican que existe un aumento de la conductividad eléctrica hacia el río Quequén Salado y hacia la línea de la principal limitante para su potabilidad, en su alto contenido salino. Esta caracterización química preliminar resulta de suma importancia para esta villa balnearia, dado que dependen exclusivamente del agua subterránea para el consumo domiciliario. Asimismo, es importante monitorear este recurso en el tiempo, principalmente durante los meses de verano, cuando su uso se incrementa con la afluencia turística.

Palabras Clave: Balneario Oriente, acuífero freático, agua subterránea.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable en cantidad y calidad es una de las mayores limitaciones para un buen desarrollo urbano (Distefano y Kelly, 2017). El agua subterránea es utilizada para el abastecimiento de agua potable debido a que posee muchas ventajas, como la calidad, fácil extracción y bajos costos. En zonas costeras, es común la utilización de acuíferos para el abastecimiento de agua de la población, ya que muchas veces es su única fuente de agua dulce. En este sentido, se destacan geoformas como cordones litorales, trenes de dunas activas y médanos como principales sectores de recarga de los acuíferos (Carretero, 2011). En estos sectores existe un interfaz de agua dulce y salada que permanece en equilibrio dinámico, y el mismo puede verse afectado por una explotación intensiva del acuífero, pudiendo generar una intrusión salina que podría alcanzar la zona de explotación (Carretero, 2011). Vinculado a esto se

puede mencionar el crecimiento de la población y las actividades económicas que incrementan la necesidad de un mayor abastecimiento de agua dulce proveniente del agua subterránea, sobre todo en los meses de verano donde la fluctuación de población turística aumenta.
El Balneario Marisol se localiza al sureste de la provincia de Buenos Aires, en el partido de Coronel Dorrego (ver Fig. 1). La población consta de 158 habitantes (INDEC, 2010), lo que representa un leve incremento con respecto al censo anterior que contaba con 60 habitantes (INDEC, 2001), presentando la región un gran desarrollo turístico, con alta actividad en época estival.

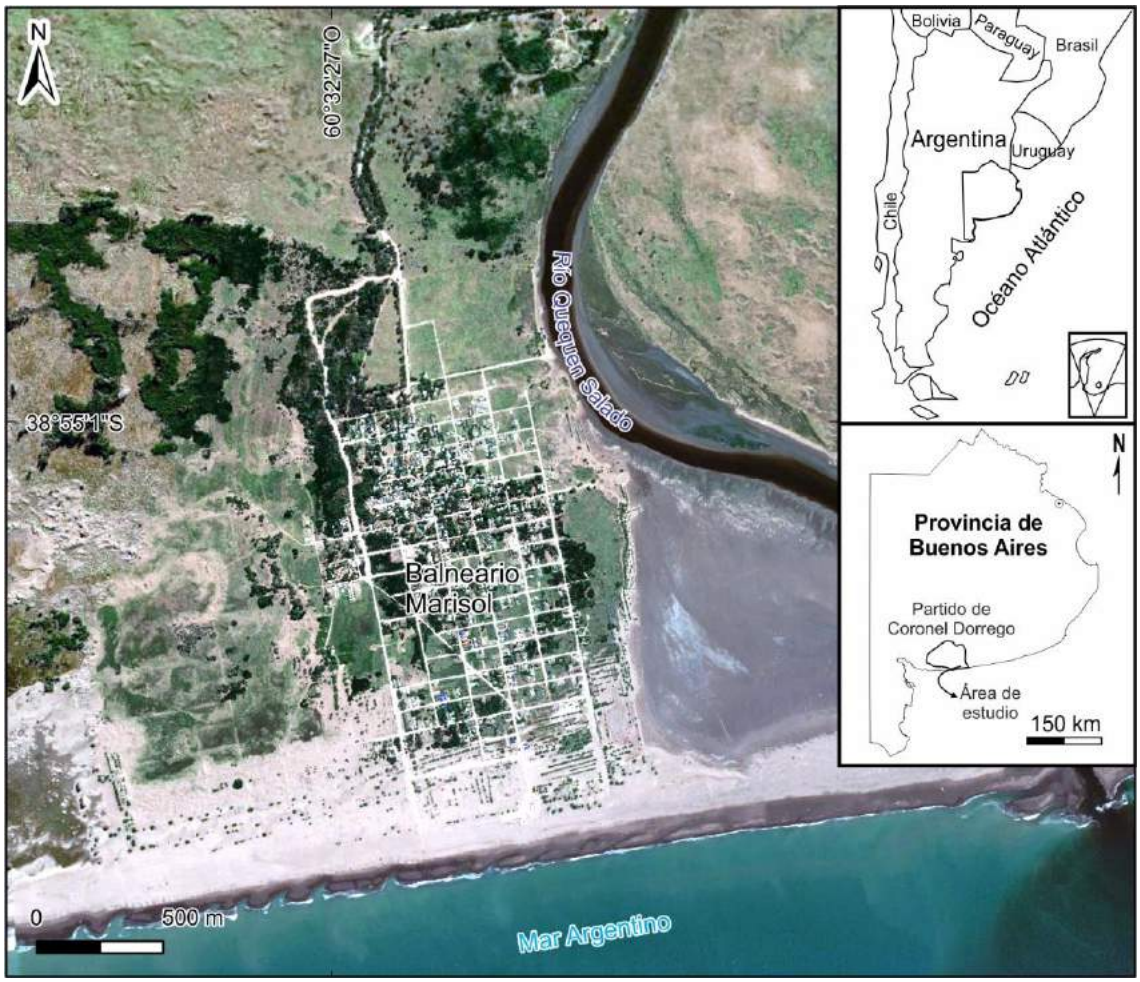


Figura 1. Ubicación del área de estudio

El significativo aumento de la población turística, el cual puede quintuplicar la población estable (González, 2016), da lugar a modificaciones dentro del ciclo hidrológico, pudiendo generar posible avance del frente salino (Carretero y Kruse, 2017). Asimismo, la población carece del servicio de cloacas por lo que el uso de pozos sépticos con mala construcción podría causar un aporte de nitratos al agua subterránea, la cual es explotada mediante perforaciones domiciliarias. En este sentido, se destaca la incipiente construcción de una red de agua en el balneario, aunque dicha red aún no llega a todos los hogares y no es potable (González, 2016). Cabe destacar que la instalación de la actual red de agua es un proyecto de la Municipalidad de Coronel

Dorrego, que aún no llega a todos los hogares y que dicho abastecimiento proviene de la misma red de agua que la localidad aledaña de Oriente (Morgan y Werner, 2014; Galliari et al., 2019).
Se destaca la falta de estudios en lo que respecta a la química del agua subterránea en el Balneario Marisol, en un área donde la población depende mayormente de este recurso para uso y consumo. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo fue realizar una caracterización hidroquímica preliminar del agua utilizada para consumo en el Balneario Marisol.

METODOLOGÍA

Inicialmente se diagramó una red de monitoreo de agua subterránea que comprende la zona urbanizada del balneario. Dicha red constó de 20 puntos de muestreo correspondientes a perforaciones domiciliarias que captan agua del acuífero freático. La toma de muestras se realizó según los protocolos recomendados por la APHA (1998) y la misma se llevó a cabo durante enero del 2020, sin registrar precipitaciones durante el muestreo.
La conductividad eléctrica (CE) y el pH se midieron con un equipo multiparamétrico portátil marca Lutron modelo WA-2017SD y posteriormente se procedió a la determinación de los elementos mayoritarios mediante métodos estandarizados (APHA, 1998) en el laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Científicas (CIG, CONICET-UNLP). El contenido de carbonatos (CO_3^{-2}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) fueron determinados por titulación. Los iones sodio (Na^+) y potasio (K^+) se determinaron por absorción atómica con fotómetro de llama, Crudo Caamaño modelo Iometer Alfanumérico, mientras que los sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-), se analizaron utilizando un espectrofotómetro UV-Visible de doble haz Shimadzu UV-160A. Por último, los sólidos totales disueltos (STD) fueron obtenidos mediante la metodología propuesta por Lloyd y Heathcote (1985).
Los valores obtenidos fueron analizados mediante un diagrama Piper (1994) y georreferenciados mediante el software QGIS 3.2.0 (QGIS Development Team, 2018) para observar la distribución de los mismos. Posteriormente las concentraciones de algunos elementos fueron comparadas de acuerdo con los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino (CCA, 2012), para observar si existen limitaciones respecto al agua de consumo.
El muestreo se complementó mediante entrevistas no estructuradas a pobladores permanentes del balneario, con el fin de obtener información vinculada a la forma de acceso del agua, la disposición de excretas, profundidad, antigüedad de la perforación y percepción respecto al agua de consumo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El agua extraída para consumo en el Balneario Marisol se realiza mediante pozos dirigidos al acuífero freático alojado en las dunas del área, y poseen una profundidad aproximada de 7 a 10 metros. La conductividad eléctrica de las muestras presentó valores promedio de 2354,7 µS/cm, teniendo como valor máximo 9410 µS/cm y como valor mínimo 810 µS/cm. En tanto que los valores de TDS fueron en promedio de 1554,1 mg/L, siendo el máximo de 6210,6 mg/L y el mínimo de 536,6 mg/L. En cuanto al pH, se determinó un valor promedio de 8,0, siendo el valor más básico 8,5 y el más ácido 7,5. El tipo de agua fue variable observando muestras Ca-HCO_3 y Na-HCO_3, pasando a Na-Cl, con solo 2 muestras como Ca-SO_4 (ver Fig. 2).

 ISBN 978-987-1323-66-1

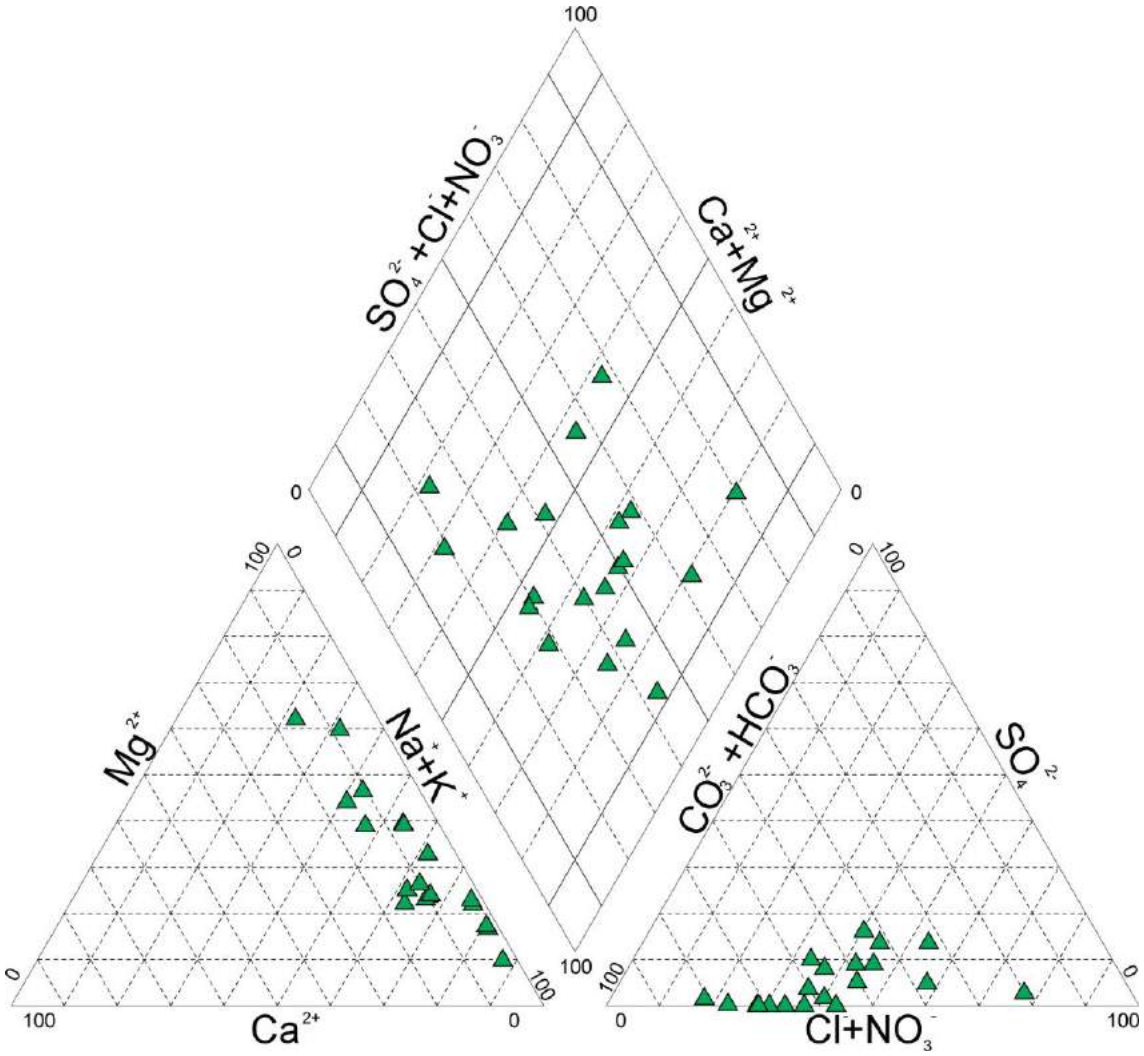


Figura 2. Diagrama Piper (1994) indicando el tipo de agua del Balneario Marisol.

Por su parte, la concentración de HCO_3^- presentó un valor promedio de 613,6 mg/L, un valor máximo de 1205,2 mg/L y un valor mínimo de 197,6 mg/L, en tanto que el valor promedio de Cl^- fue de 417,2 mg/L, siendo su máximo 2964,5 mg/L y su mínimo 55,9 mg/L. Por otro lado, el Ca^{2+} presento una concentración promedio de 41,5 mg/L, con un máximo y mínimo de 94,6 y 3,6 respectivamente. Por su parte, el Mg^{2+}, arrojo concentraciones promedio de 94,7 mg/L, un máximo de 247,0 mg/L y un mínimo de 7,6 mg/L, mientras que el Na^+ posee un promedio de 398 mg/L, con 2120 mg/L como máximo y 54 mg/L como mínimo.

En cuanto al NO_3^-, el valor promedio es de 7,1mg/L, cómo máximos y mínimos presenta 20,2 mg/L y 2.1 mg/L respectivamente, exceptuando 4 muestras, pueden ser considerados como valores de fondo (Canter, 1996).

Respecto al contenido de STD, se pudo observar que existe una gran variación en los mismos (ver Fig.3). La figura 3 evidencia que dichos valores poseen una tendencia creciente hacia el río y el mar, lo cual podría ser indicativo de la interfaz agua dulce-agua salada, situación común en sectores con características similares (Rodrigues Capítulo, 2015; Carretero y Kruse, 2017). En este sentido, los pobladores que se encuentran más cercanos a estos sectores se verían más afectados que aquellos ubicados

en el sector NO, debido a que las dunas del sector funcionan como zonas de recarga. Sin embargo, es necesario realizar futuros estudios que tiendan a comprender en mayor detalle el funcionamiento del sistema.

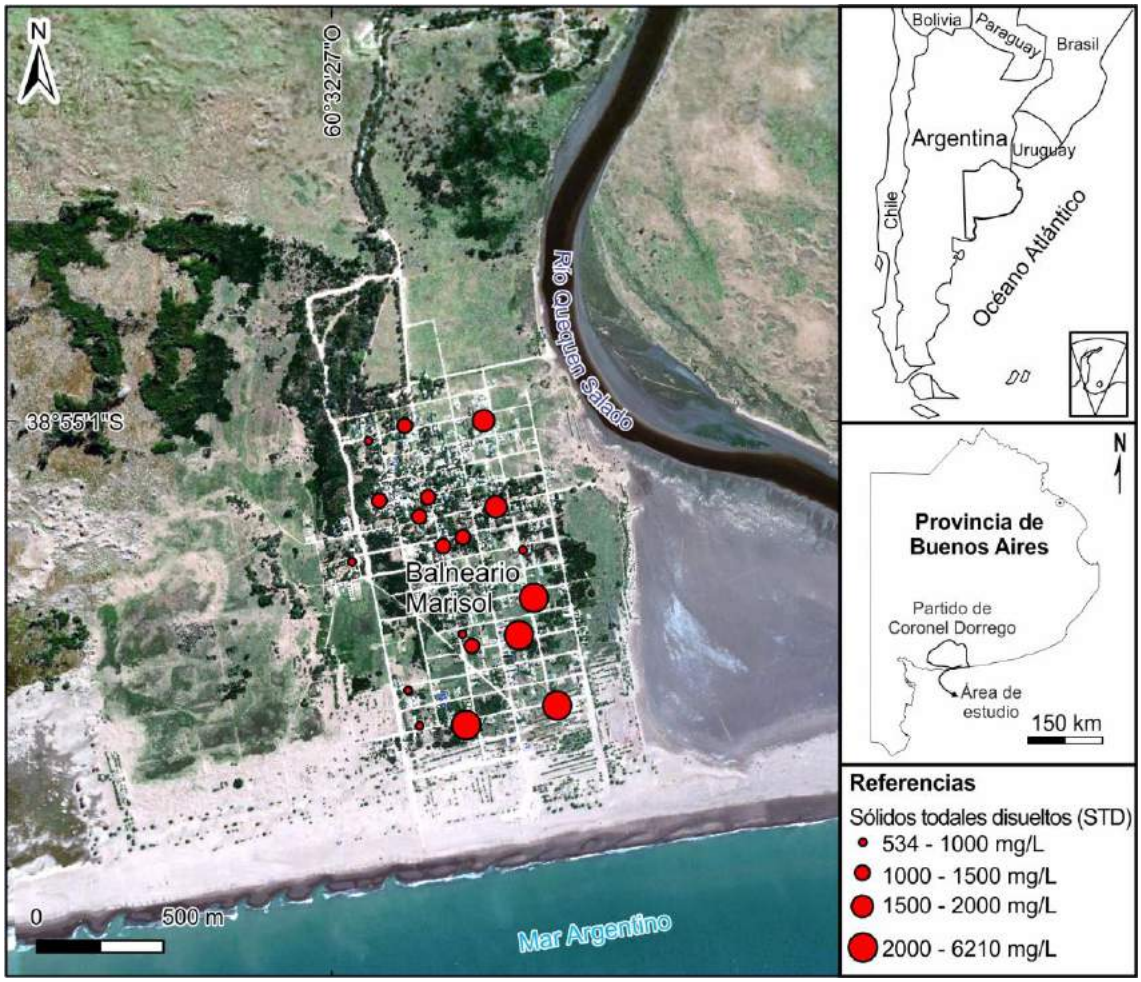


Figura 3. Distribución de los sólidos totales disueltos (STD) en el área de estudio.

En cuanto a las entrevistas realizadas (20) se recoge que en el 50% de los hogares visitados, el agua que se consume proviene del acuífero freático sin tratamiento previo, el otro 50% restante, consumen agua embotellada o de red, en donde la mayor parte de los pozos utilizados tienen una antigüedad de 30 años aproximadamente. En cuanto al conocimiento por parte de los pobladores asociado a la potabilidad del agua subterránea, un 80% la considera muy salada para beber, además al verla, por su color castaño, les genera desconfianza con respecto a su calidad para la ingesta. Por otra parte, evidenciaron una preocupación respecto al As, un elemento químico común en el agua de zonas cercanas (Santucci y Carol, 2015).

Respecto a la potabilidad del agua utilizada para consumo, se destaca que la misma posee limitantes respecto a los valores de STD, encontrando que 6 muestras superan el valor de 1500 mg/L de STD sugeridos por el CAA (2012), principalmente en los sectores más próximos a la línea de costa. Asimismo, estas muestras también superan el límite de 350 mg/L de Cl^- sugerido por dicho organismo. Por su parte, los valores de NO_3^- fueron relativamente bajos, y no representan un riesgo para la salud de los

pobladores según el límite de 45 mg/L sugerido por el CAA (2012), esto podría deberse a que las fosas sépticas están bien construidas a pesar de que las mismas se encuentran cercanas las perforaciones (2-5m).

CONCLUSIONES

El análisis preliminar del agua utilizada para consumo en el Balneario Marisol evidenció que en su totalidad el agua proviene del acuífero freático, exceptuando que, aunque algunos hogares estén conectados a la red de agua potable, conservan sus pozos y los utilizan para otras tareas domésticas. El agua subterránea de dicho acuífero presentó solo ciertas limitantes respecto a lo establecido por el CAA, principalmente respecto a su alto contenido salino. Por su parte, si bien los valores de nitratos registrados fueron bajos, solo algunas muestras evidenciaron valores que podrían indicar una contaminación debido a la cercanía de fosas sépticas a los pozos de abastecimiento, pese a esto, ninguno superó los valores máximos sugeridos por el CAA.
Respecto a las entrevistas realizadas, se puso en manifiesto que existe una falta de conocimiento sobre la calidad del agua subterránea que consumen los pobladores. Asimismo, los habitantes pusieron en manifiesto su inquietud por la presencia de As en el agua de consumo. Los datos obtenidos en el presente trabajo indican un aumento de la salinidad hacia la línea de costa, teniendo que monitorear esta situación en próximos estudios.
El presente estudio es preliminar, teniendo que abordar a futuro otras variables como la cuantificación de elementos traza para determinar si su contenido puede afectar la potabilidad del agua.

REFERENCIAS

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).

Canter, L.W. Nitrates in Groundwater. *CRC Press*. (1996).

Carretero, S. Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral, FCNyM, Universidad Nacional de La Plata* (2011).

Código Alimentario Argentino. *Capítulo XII, Artículos: 982 al 1079-Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas* (2012).

Distefano, T., Kelly, S. *Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. Ecological Economics*, 142, 130-147 (2017).

Galliari, M. J., Tanjal, C., Carol, E., Villalba, E. Monitoreo de la calidad del agua en Costa del Este (Buenos Aires). *Actas del 7º Congreso de Ciencias Ambientales, COPIME 2019.* (2019)

González, A. V. Marisol, el pueblo balneario dorreguense que crece. Propuestas para un desarrollo sostenible (2016).

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Censo nacional de población, hogares y vivienda. Buenos Aires. Argentina (2001)

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Censo nacional de población, hogares y viviendas (2010).

Morgan, L. K., Werner, A. D. Seawater intrusion vulnerability indicators for freshwater lenses in strip islands. *Journal of Hydrology*, 508,322-327. (2014)

Piper, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union.* 25(6), 914-928 (1944).

QGIS Development Team. *QGIS geographic information system. Open Source Geospatial Foundation Project. https://www.qgis.org/*. Accessed 26 June 2018.

Rodrigues Capítulo, L. Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la Provincia de Buenos Aires. *Doctoral dissertation; Universidad Nacional de La Plata* (2015).

Santucci, L., Carol, E. Evaluación de la aptitud del agua para consumo humano en balnearios del sureste de la provincia de Buenos Aires. *XXIII Jornadas de Jóvenes Investigadores de la AUGM*. La Plata (2015).

RELACIÓN ENTRE LAS PRECIPITACIONES Y LAS VARIACIONES PIEZOMÉTRICAS EN LA QUEBRADA DEL RÍO POMÁN – CATAMARCA – ARGENTINA

Tálamo E.[a], Vilches F.[a], Díaz Ramos F.[a] y Morales G.[a]

[a]*Departamento de Geología, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*

e-mail: esteban.talamo@gmail.com

RESUMEN

El trabajo de investigación se realiza en la quebrada del río Pomán, cuya cuenca se desarrolla en el faldeo occidental de la sierra de Ambato, descargando sus aguas en la depresión de Pipanaco. El objetivo general del proyecto de investigación que motiva este trabajo, es la determinación del caudal subterráneo que ingresa al sistema de Pipanaco, para lo cual se aplicarán cálculos que requieren de datos tales como el gradiente hidráulico del acuífero, la permeabilidad de los depósitos que lo constituyen y su área o sección, en un perfil transversal realizado en proximidades del Camping Municipal. Una de las líneas de investigación busca relacionar el comportamiento piezométrico del acuífero en función de las precipitaciones que ocurren en la zona, para lo cual se realizan mediciones permanentes de niveles piezométricos en perforaciones y se comparan las variaciones con los episodios de lluvias registradas en un termopluviómetro existente en las proximidades del sitio.

Se presentan en este trabajo los resultados de los registros obtenidos entre abril de 2019 y febrero de 2020, advirtiendo una interesante relación y respuesta inmediata de las variaciones de nivel piezométrico con la pluviometría.

Palabras Clave: Río Pomán, nivel piezométrico, precipitaciones

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo constituye una de las etapas metodológicas planteadas en el Proyecto de Investigación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Catamarca denominado: “Variaciones de niveles piezométricos en el subálveo del río Pomán, una metodología para entender el aporte a la recarga del sistema acuífero de Pipanaco”, en el cual se busca determinar procesos de recarga al sistema acuífero regional del Salar de Pipanaco.

La recarga de un acuífero es una de las componentes que surge del balance hidrológico global, con mayor incertidumbre en regiones áridas. La cuenca hídrica del río Pomán, colecta las aguas del faldeo occidental de la sierra de Ambato y las conduce por su colector principal hasta abandonar el sistema serrano. Es en este sitio, donde se produce una captación parcial de su caudal, para usos múltiples (riego y consumo humano), por lo que el excedente fluye de manera superficial y también subterráneamente por el álveo del río (conformado por sedimentos aluviales y fluviales gruesos). De esta manera se produce un doble mecanismo de recarga al acuífero principal del Salar de Pipanaco: 1° por infiltración del agua superficial excedente y 2°: por recarga indirecta por

transferencia desde el álveo al reservorio mencionado (Tálamo et al., 2019). La cuantificación del flujo pasante por subálveo y por ende la magnitud de este sistema de recarga, resultan una incógnita en este tipo de cuencas, por lo cual se considera valioso establecer las metodologías para lograrlo y valorar los resultados obtenidos. Parte de las metodologías necesarias para el cálculo de este flujo, consiste en establecer el gradiente hidráulico del acuífero relacionado al álveo del río Pomán y sus variaciones en el tiempo, como así también las variaciones del espesor saturado.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el faldeo occidental de la sierra de Ambato, entre las coordenadas 28° 23' 52.54" latitud Sur y 66° 12' 9.75" longitud Oeste (extremo Norte), y 28° 24' 46.78" latitud Sur y 66° 12' 9.06" longitud Oeste (extremo Sur), en el departamento Pomán, Provincia de Catamarca. Ver Fig. 1.

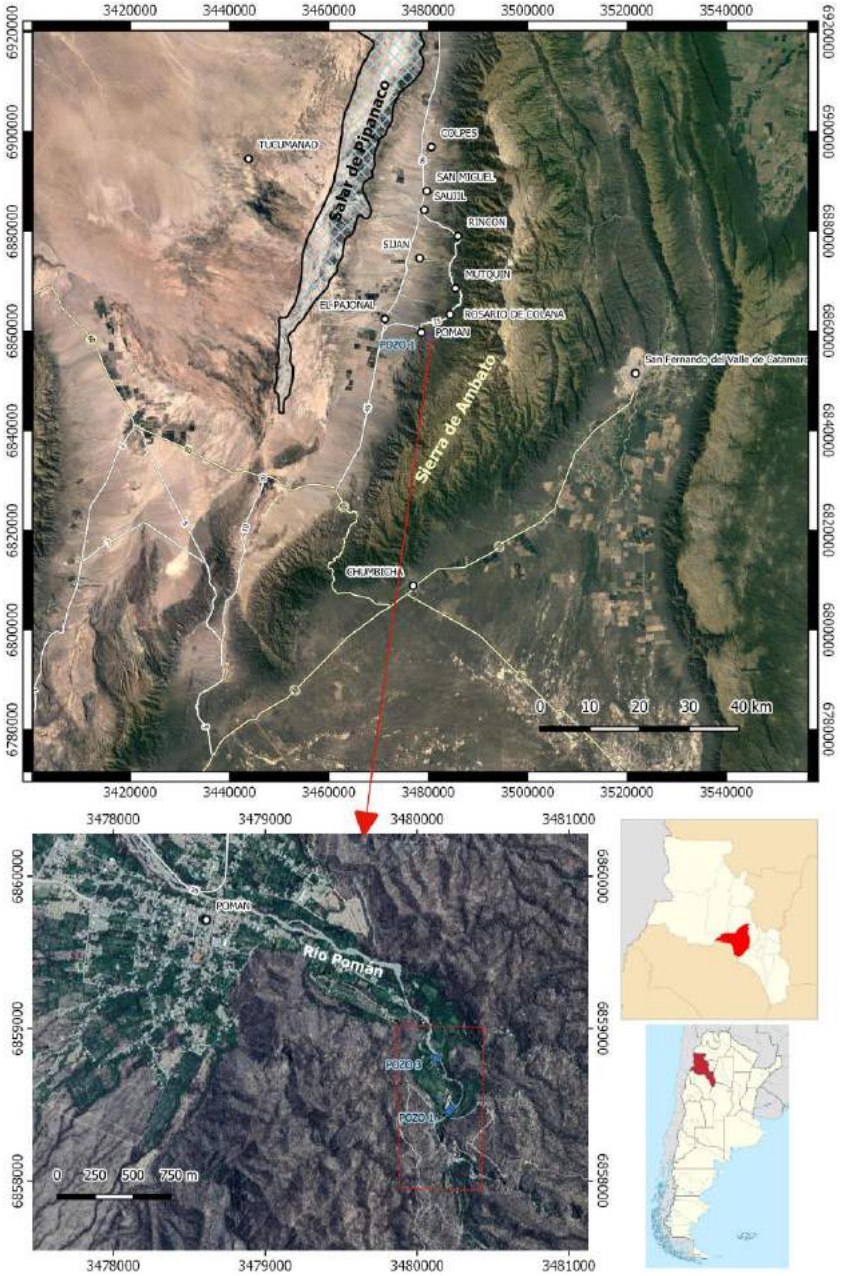


Figura 1. Ubicación general de la zona de estudio.

OBJETIVOS

El principal objetivo del trabajo, es mostrar la relación entre las variaciones piezométricas medidas en las perforaciones existentes en el Camping Municipal y los eventos de lluvias registrados en el termopluviómetro perteneciente a la autoridad de Agua Potable y Saneamiento de la Provincia de Catamarca, situado en la Planta Potabilizadora de Pomán.
Las variaciones de nivel, serán indicadoras del espesor del acuífero estudiado y por ende de la sección de flujo subterráneo, por el cual se transfiere agua desde el ambiente montañoso al piedemonte occidental de la sierra de Ambato.
En esta contribución se muestran los datos logrados entre abril de 2019 y febrero de 2020, constituyendo este segmento de tiempo, un parcial de los dos años que se pretenden medir.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Medición de niveles piezométricos

Para la medición de las variaciones del nivel piezométrico se instalaron divers en los Pozos N° 2 y 3 existentes en la zona de la quebrada (ver Fig.1). Estos dispositivos se sumergen en el interior del pozo y miden mediante una membrana, la presión hidrostática, almacenando en su memoria la altura de agua presente sobre el instrumento (ver Fig. 2 y 3). Estos datos de la columna de agua, se transforman luego en nivel, referido a la boca del pozo, mediante la medición manual del nivel estático en el momento de la instalación (ver Fig.3).

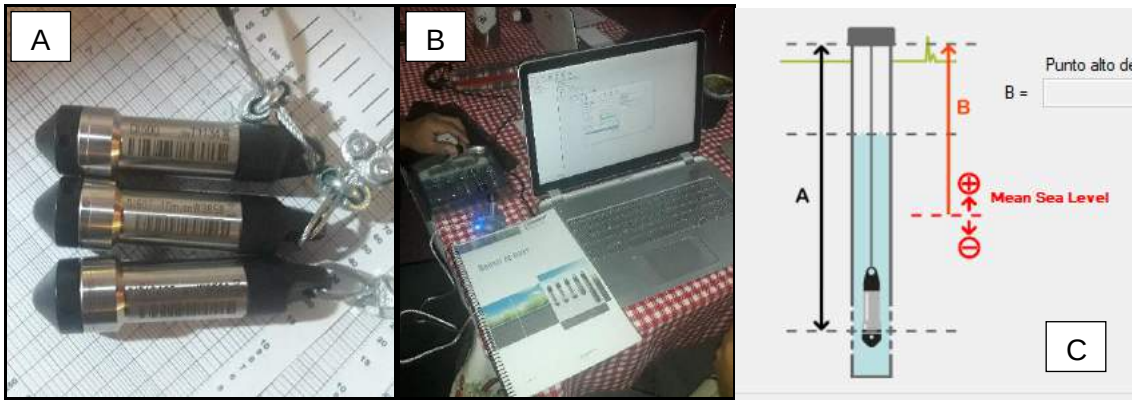


Figura 2. A) Divers utilizados para mediciones de nivel. B) Programación de los divers. C) Esquema de instalación y referencia.

Los datos de presión hidrostática almacenados en el diver, son compensados con las mediciones de presión atmosférica adquiridas con otro instrumento instalado en las proximidades de las perforaciones. De esta manera se logran registros que no muestran la incidencia de la presión exterior.



Figura 3. Instalación del diver en la perforación y medición del nivel estático.

Registro de Precipitaciones

El registro de las lluvias que ocurren en la zona, se lleva a cabo mediante un termo pluviómetro marca SCHLAB situado en la planta potabilizadora de la localidad de Pomán, distante a 460 metros del Pozo 3 y a 780 metros del Pozo 2. (Ver Fig.4).



Figura 4. Ubicación de perforaciones y del termopluviómetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Marco climático local

De manera resumida, la región se caracteriza por una marcada aridez y temperaturas templadas. El efecto orográfico de las montañas que la circundan es notable y produce un efecto de barrera climática para los vientos húmedos occidentales. De esta manera, se produce una gradación de un clima desértico en el centro de la cuenca, a uno semidesértico en las laderas bajas e, incluso, sub-húmedo en las vertientes de los sistemas serranos. En líneas generales, al analizar las precipitaciones, puede observarse que la pluviometría disminuye en la dirección del viento, de NE a SO a escala regional, pero se incrementa con la altitud de forma radial-centrípeta a escala local, en el interior de los valles y bolsones. Las precipitaciones anuales varían desde 100 mm en el centro de la cuenca, 300 mm en los piedemontes a 600 mm en los faldeos montañosos. Las precipitaciones son de tipo torrencial. (Tálamo et al. 2016)
También debe recordarse la irregularidad espacial de las descargas pluviométricas en este tipo de relieves y de clima.

Registro de niveles estáticos y precipitaciones

El gráfico de registros de niveles estáticos, adquiridos entre abril de 2019 y febrero de 2020, muestran importantes variaciones comprendidas entre 11.9 y 10.5 mbbp (metros bajo boca de pozo), totalizando 1.4 metros de oscilaciones entre los niveles más someros y los más profundos. (Ver Fig. 5).
En líneas generales se aprecian ascensos de los niveles piezométricos desde las pequeñas precipitaciones ocurridas entre mediados de abril y mediados de mayo. Luego se observa un descenso sostenido hasta el 4 de junio, fecha a partir de la cual inicia un ascenso general hasta el 15 de octubre de 2020. En este período, el termopluviómetro registró algunas precipitaciones menores, por lo que seguramente influyeron lluvias que podrían haberse generado en la zona alta de la cuenca, que no impactaron en el punto de medición de Pomán. Se destaca la precipitación ocurrida el 15 de junio, que genera un ascenso inmediato en el nivel estático del Pozo N°3.
Se observa otro importante evento de precipitación registrado en Pomán entre el 13 y 15 de octubre, (superando los 55 mm) que ocasionó una respuesta inmediata de ascenso de nivel en el Pozo N°3 (Ver Fig. 5). Posteriormente, hasta el 10 de noviembre se detecta una clara baja de los niveles (alcanzando los 11.64 mbbp) para luego reaccionar nuevamente en ascensos productos de lluvias ocurridas a principios del mismo mes.
El Nivel estático más profundo (11.9 mbbp) fue registrado a mediados de diciembre, en el tramo donde existen datos de precipitaciones muy bajas.
Cuando se analiza el gráfico en diferentes escalas de detalle, surgen coincidencias de respuestas inmediatas del acuífero ante la ocurrencia de lluvias registradas en el termopluviómetro.
Los registros de niveles continuaron hasta febrero de 2020, y se encuentran en proceso los datos de precipitaciones pertenecientes a ese período faltante.

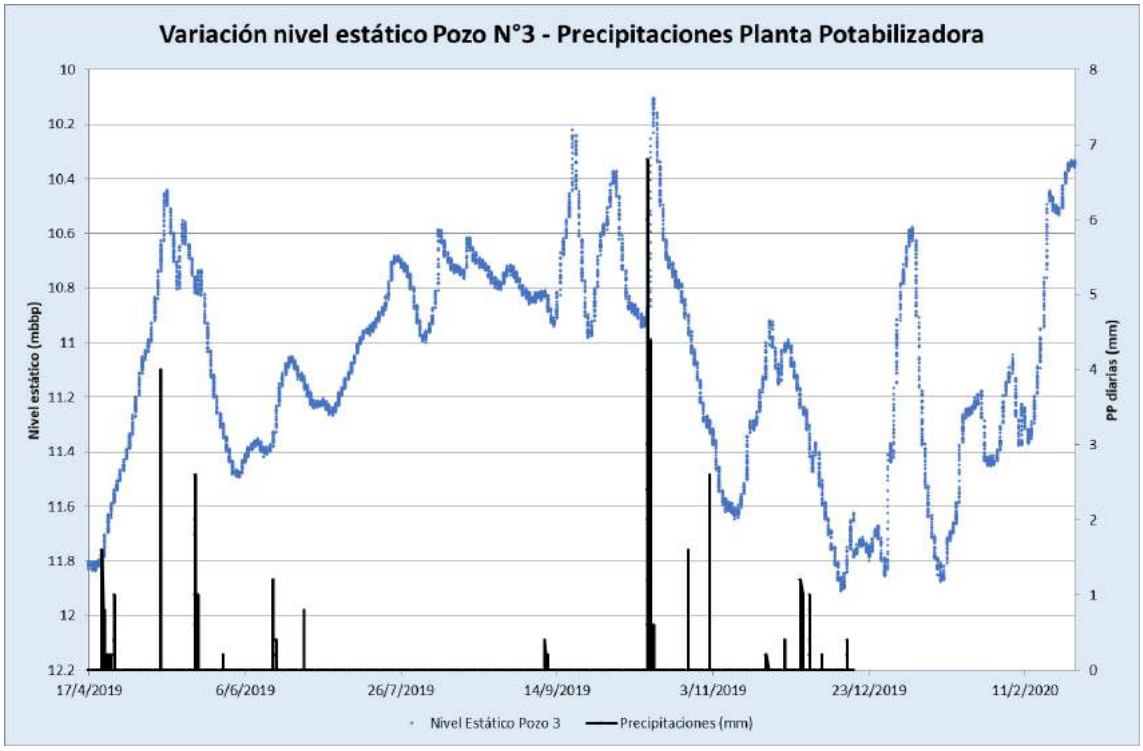


Figura 5. Gráfico de variaciones de nivel piezométrico y precipitaciones.

CONCLUSIONES

La metodología empleada, resulta conveniente para el análisis de las variaciones piezométricas de un acuífero libre y su posterior relación con las lluvias locales.

Se demuestra que, numerosos eventos de precipitaciones registrados en el termopluviómetro de Pomán, generan una reacción inmediata del acuífero, manifestada por un ascenso del nivel estático en el pozo monitoreado.

También se destacan algunos ascensos de niveles que no tendrían un indicador de precipitaciones en función de los datos del termopluviómetro utilizado, pero que se explicarían con lluvias ocurridas en la alta cuenca, sin influencia en el sitio exacto de medida en Pomán.

En el período analizado, se pudo advertir una variación del nivel estático en el Pozo N°3 de 1.4 metros, entre los valores máximos y mínimos registrados. Esta variación representaría el 7 % del espesor del acuífero, establecido por métodos geofísicos en 19 metros (Tálamo et al., 2019).

REFERENCIAS

Tálamo E., Rodríguez M., Bea S., Vives L., Mira A., García R., Moya Ruiz F. y Rocha V. Modelo hidrogeológico conceptual del Salar de Pipanaco, Provincias de Catamarca y La Rioja, Argentina. 2019. Hidrogeología Regional Editores: Dr. Rodolfo Fernando García – Dra. Mónica Blarasín. ISBN 978-987-661-224-1I. Publicado en el marco del X CONGRESO ARGENTINO DE HIDROGEOLOGÍA y VII SEMINARIO HISPANO-

LATINOAMERICANO SOBRE TEMAS ACTUALES DE LA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. Pp 87-97.

Tálamo E., Brusa S., Martínez G., Vilches F. y Morales G. Determinación del caudal pasante y parámetros hidráulicos en una sección del subálveo del río Pomán. Provincia de Catamarca. 2019. Actas de Trabajos Completos, ICES 2014. San Rafael, Mendoza. Pp 346-358.

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN Y ESPESOR DE UN GLACIAR DE ESCOMBROS ACTIVO

Toledo M. A.[a], Ahumada A. L.[ab] y Ibañez Palacios G. P.[a]

[a]*Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Tucumán, ARGENTINA*
[b]*CONICET, ARGENTINA*

e-mail: matoledo@lillo.org.ar

RESUMEN

Los glaciares de escombros son reservorios de agua dulce congelados localizados en regiones de altas montañas. En este trabajo se estudia el glaciar de escombros activo denominado "GA4", ubicado en la Cuenca Cerrillos, provincia de Catamarca, con el propósito de obtener su volumen total y de hielo aproximados, aplicando dos metodologías: la primera de ellas, propuesta en este trabajo, se realiza, a partir de curvas de nivel obtenidas del DEM del satélite ALOS PALSAR con el software Qgis 2.18.24 y 3.12. Aplicando la herramienta de Interpolación se configuró la superficie el glaciar de escombros (TIN) y una superficie basal (TIN-2) empleando una función polinómica de quinto grado, que permitió definir las cotas aproximadas del fondo del valle cubierto por el glaciar de escombros. Estas cotas vinculan a la vez la línea de fondo de valle actual (aguas abajo de GA4), con la ladera (aguas arriba de GA4). Aplicando una operación matemática con la calculadora raster entre el TIN y TIN2 pudo determinarse el volumen aproximado del glaciar. La segunda metodología se basa en la aplicación de una fórmula empírica aplicada por diferentes autores. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos con ambas metodologías. Con la metodología propuesta se obtuvo el volumen total para el glaciar de escombros activo "GA4", su espesor máximo y espesor promedio. Se considera que el volumen de hielo estimado en glaciares de escombros activos es del 40% al 60% del volumen total. Debido al incremento de la temperatura en la alta cuenca durante las últimas décadas, se ha considerado para el cálculo de contenido de hielo el menor porcentaje. Los resultados alcanzados con la metodología propuesta muestran diferencias con el volumen obtenido al aplicar una fórmula empírica para el glaciar de escombros GA4.

Palabras Clave: Glaciar de escombros, DEM, ALOS PALSAR, TIN, Cálculo de volúmenes

INTRODUCCIÓN

Los glaciares de escombros son considerados reservorios de agua dulce congelados y reguladores hidrológicos, en regiones montañosas continentales áridas a semi-áridas. También denominados glaciares rocosos o litoglaciares, son mesoformas criogénicas compuestas por una masa de fragmentos o bloques de rocas y material fino que yacen en una pendiente y contienen hielo intersticial o partes con hielo macizo; si son activos, se mueven lentamente pendiente abajo por deformación plástica y reptación del permafrost (Corte, 1976), por lo que son geoindicadores de la presencia de permafrost de montaña. Se denomina permafrost al suelo o roca que permanece con temperaturas por debajo de 0ºC por dos o más años consecutivos (Trombotto y Ahumada, 2005). Según Humlum (1998), el inicio y el crecimiento de los glaciares de escombros activos no se conoce todavía en detalle. Basado en evidencias de campo, algunos autores

afirman que los glaciares de escombros son de origen periglaciar, mientras que otros autores argumentan que muchos glaciares de escombros contienen un núcleo significativo de hielo glaciar, Humlum (2000). Trombotto (2000) considera que mucho del permafrost en los Andes es relíctico, producto del último período glacial. Humlum (2000), considera que la reología y nomenclatura sobre glaciares de escombros surge a partir de opiniones muy diversas de autores como: Haeberli (1985); Barsch (1987, 1996); Humlum (1988, 1996); Jacob (1994) o Hamilton y Whalley (1995).

Wahrhaftig y Cox (1959), fueron probablemente los primeros en calcular el volumen de roca de origen glaciar con el propósito de estimar las tasas de retroceso de la cabecera de los glaciares descubiertos, asumiendo que la porosidad media de los glaciares de escombros era del 40%. Barsch (1977 a, b) asumió un mayor contenido de escombros del 40% y 50% (por volumen) en glaciares de escombros activos, pero posteriormente, las investigaciones de Haeberli (1989), lo llevó a sugerir como valor más apropiado el 30% (Barsch, 1996).

Los glaciares de escombros son considerados acuíferos potenciales. Esta condición es demostrada por los arroyos que fluyen desde sus frentes. Los glaciares escombros activos consisten de una mezcla de 40 al 60% de material clástico y 60 al 40% de hielo intersticial y de segregación Haeberli (1985), Barsch (1996) y Arenson et al, (2002), cubierta por un manto de clastos generalmente gruesos que constituye lo que se denomina capa activa de descongelamiento estacional (Barsch, 1996). Esta capa funciona como capa aisladora e impide el descongelamiento del permafrost subyacente.

Brenning (2003) considera que la mayor parte del agua almacenada en un glaciar de escombros no se derrite, sino por un recalentamiento climático, expresa además que el hielo de un glaciar de escombros se encuentra eliminado del ciclo hidrológico, durante un largo tiempo, probablemente milenios. Como consecuencia, los glaciares de escombros activos pueden ser considerados básicamente como sumideros de agua en el sistema hidrológico.

Según Humlum (2000), en pocos sitios del mundo se ha medido el espesor de los glaciares por medios directos, a través de perforaciones, o por investigaciones geofísicas. Por lo tanto, la mayoría de los valores de espesor de glaciares de escombros publicados representan estimaciones morfológicas derivadas de la altura del frente del glaciar de roca (Calkin et al., 1987), o son medidas indirectas determinadas desde el área de la superficie del glaciar de roca (Barsch, 1977 a, b). Los resultados publicados, sin embargo, sugieren un espesor típico de glaciar de roca que oscila entre 15 y 80 m, mientras que los pocos datos obtenidos de perforaciones o medios geofísicos indican espesores de unos 50 m (Humlum, 2000).

Con el propósito de evaluar la disponibilidad, estado y vulnerabilidad de la criósfera en el Noroeste Argentino, se realizaron numerosas publicaciones, una recopilación de las mismas puede ser consultada en Ahumada et al, (2017).

La degradación del permafrost es uno de los factores cruciales de los que depende la estabilidad de laderas en alta montaña y está fuertemente relacionada con las alteraciones y los cambios atmosféricos relacionados con el calentamiento global (IPCC, 2013). La inestabilidad de los glaciares de escombros promueve la aceleración de transporte detrítico en forma rápida y peligrosa y la pérdida de reservas hídricas congeladas. Esta región intratropical de los Andes Áridos es particularmente vulnerable al calentamiento global, por la fragilidad de los ecosistemas y por la alta vulnerabilidad de la población (Ahumada et al, 2014).

Los cambios potenciales futuros del permafrost, asociados al calentamiento global pueden afectar el estado natural de las pendientes de montaña provocando cambios en la actividad geomórfica: el aumento de temperaturas de superficie puede provocar el adelgazamiento de la capa activa; descongelamiento basal del permafrost, causando su pérdida de espesor y en consecuencia cambios hidrogeológicos (Ahumada, 2007).
En este contexto, en el presente trabajo se presenta una metodología experimental tendiente a determinar el espesor y volumen aproximados de un glaciar de escombros activo de valle, denominado "GA4", emplazado en la cuenca Cerrillos, ubicada en la ladera occidental de la Sierra del Aconquija, provincia de Catamarca, con el propósito de calcular su volumen y contenido de hielo aproximado. Los resultados son comparados con la fórmula empírica de Brenning (2005) "ver Ec. (2)", aplicada al mismo glaciar.

CARACTERISTICAS DE LA REGIÓN DONDE SE EMPLAZA EL GLACIAR DE ESCOMBROS GA4

En la ladera occidental de la Sierra del Aconquija, provincia de Catamarca, se encuentran geoformas glaciares y periglaciares que contienen permafrost. Estas geoformas se nutren de precipitaciones en forma de nieve y agua, y por los procesos de congelamiento y descongelamiento estacional conforman un sistema hidrológico complejo que aporta caudales líquidos variables a los arroyos, a través del hielo contenido en las mismas y se encuentran ubicados en sitios de difícil acceso, caracterizados por altas pendientes y su posición altitudinal "ver Fig.1".

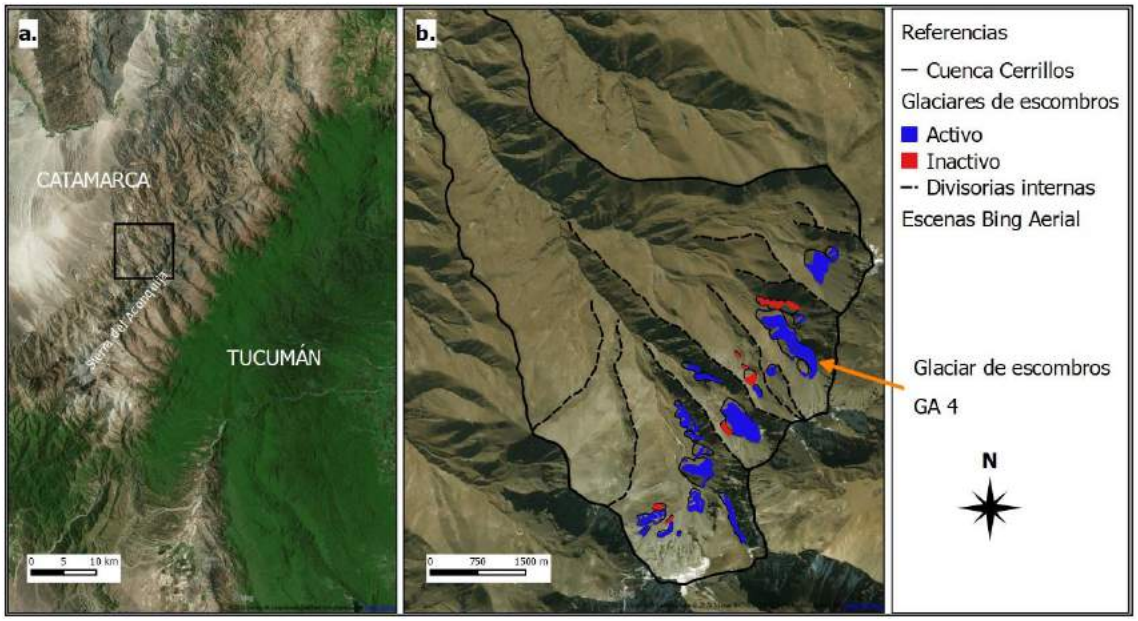


Figura 1. **a.** Ubicación de la cuenca Cerrillos en la ladera occidental de la Sierra del Aconquija. **b.** Distribución espacial de los glaciares de escombros en la cuenca

Estas geoformas se componen y asientan en discordancia sobre rocas metamórficas y graníticas de edad precámbrica a paleozoico inferior. Las rocas metamórficas se componen de pizarras, filitas y micacitas de mediano a alto grado de metamorfismo con intrusiones graníticas, González Bonorino (1951).

El gradiente térmico regional es de 0,55 ºC cada 100 m y tomando como referencia la TMA (Temperatura Media Anual) de 13,1 ºC de la estación meteorológica de Tafí del Valle (1976 msnm) la TMA extrapolada para 4000 msnm sería de 2,1 ºC. La topo región desde los 4000 hasta los 5000 msnm o más, corresponde a un clima seco de alta montaña o polar de altura, clima de Tundra, ET de la clasificación de Köppen (1931). En este clima el suelo está frecuentemente congelado hasta considerables profundidades. La TMm (Temperatura Media mensual) de enero es cercana a 0 ºC y la de julio a los -10 ºC (Minetti, 2005).
Las precipitaciones en la cumbre alcanzan los 300 mm, disminuyendo al descender hacia el Valle de Santa María (1900 msnm) hasta promedios de 150 mm, configurando un clima semi-desértico a desértico, con gran amplitud térmica y marcada sequedad. Las lluvias se concentran en el verano. Las precipitaciones están influenciadas por el anticiclón del Atlántico Sur en la estación húmeda y la influencia del frente polar y los vientos del oeste en el invierno. Esta estación es fría y rigurosa, con nevadas esporádicas sobre la Sierra de Aconquija. Esta ladera se incluye en el tipo de regiones sin ningún excedente de agua y con un elevado déficit hídrico. Las precipitaciones níveas son esporádicas o ausentes en invierno y las de granizo se registran desde diciembre a marzo.
La radiación global es de 180 Kcal/cm^2 al año (Minetti ,2005) para la zona. La línea de nieve actual se ubica en una altura entre 5000 msnm y 5100 msnm (Fox y Strecker, 1991). Ocasionalmente esta región es afectada por los eventos ENSO en sus fases El Niño y La Niña (Bianchi et al, 2005).
En el NOA el permafrost discontinuo detectado a diferentes alturas y condiciones climáticas locales por Ahumada et al, (2007), presenta una condición térmica actual en desequilibrio con el modelo climático de Haeberli (1985). En este modelo, el rango de precipitación para la formación de glaciares de escombros sería de 400 a 2500 mm anuales y el de temperatura promedio anual sería de -15 a -2 ºC., por lo que los glaciares de escombros del NOA se encontrarían en equilibrio inestable.

MORFOLOGÍA DEL GA4

El glacial de escombros activo GA4 se sitúa en los 27°10´43,51´´de Latitud Sur y 66°04´36,42´´de Longitud Oeste, entre los 4615 y 5018 msnm. Se emplaza en un valle encajado de origen glaciar, el cual constituye un circo limitado por una divisoria de aguas, cuyas alturas varían entre 4800 y 5370 msnm. Este circo presenta crestas afiladas constituidas por rocas metamórficas con elevado grado de gelifracción. El área de aporte de sedimentos al glaciar, estimada en 52,11 ha, se encuentra expuesta a altas tasas de meteorización, con pendientes que varían entre el 49 al 70%, en longitudes de pendiente de 230 a 780m.
El glaciar de escombros GA4 se orienta hacia el NO, conformando una lengua compuesta de 1500,78 m de longitud en el sentido de su desplazamiento. El ancho máximo es de 348,59 m y medio de 212,57m. Según su estructura es un glaciar multiunidad, compuesto por glaciares menores superpuestos, por lo que muestra un relieve que presenta cuatro superficies: Sa(0,23ha), Sb(0,85ha), Sc(6,25ha) y Sd(11,06ha), “ver Fig.2a”. Tomando en cuenta la extensión de su área de aporte se clasifica como multiraiz.
Presenta un potente talud frontal, de altura entre 60 y 74m, con una pendiente de 35° a 42°, las alturas de los taludes laterales varían entre 7 y 20m, con inclinaciones cercanas

a los 35 °. Las pendientes de las superficies decrecen al disminuir la altura. Es así, que la superficie Sa tiene una pendiente media de 30%, Sb: 26%, Sc: 18% y Sd: 17,3%.
Los rasgos superficiales (textura y estructura) de los frentes de talud, surcos erosivos y clastos de variada granulometría en la base de los taludes, observados en imágenes satelitales y el aplicativo Google Earth, indican una dinámica activa. También en las superficies pueden observarse una textura gruesa, compuesta por bloques, surcos y grietas de distensión.
Las curvas de nivel con equidistancia de 20m "ver Fig. 2", resaltan la expresión superficial del glaciar de escombros, y de la cuenca donde se encuentra.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología propuesta se basa en reconstruir, a través de medios informáticos, la superficie del fondo del valle glacial cubierto por los sedimentos que componen el glaciar de escombros. Para ello se considera que el perfil longitudinal del valle presenta una forma cóncava, aunque el sustrato rocoso no es excavado en forma uniforme, dejando una serie alternada de umbrales y cubetas (Strahler, 1988). Tomando en consideración lo expresado, se siguió la siguiente metodología:
Con el aplicativo Google Earth pro se digitalizaron tres transectas "ver Fig.2b":
Transecta 1 (1250m): trazada sobre la superficie de un glaciar cubierto, hacia aguas arriba, hasta la base del talud frontal del glaciar.
Transecta 2 (1150m): trazada desde la base del talud frontal, sobre la superficie del glaciar hasta el quiebre de pendiente con la ladera, siguiendo aproximadamente su eje de movimiento, dado que el mismo concordaría con el fondo del valle.
Transecta 3 (672m): trazada desde el quiebre de pendiente, hacia aguas arriba, siguiendo la ladera, sobre el área de aporte de sedimentos al glaciar.

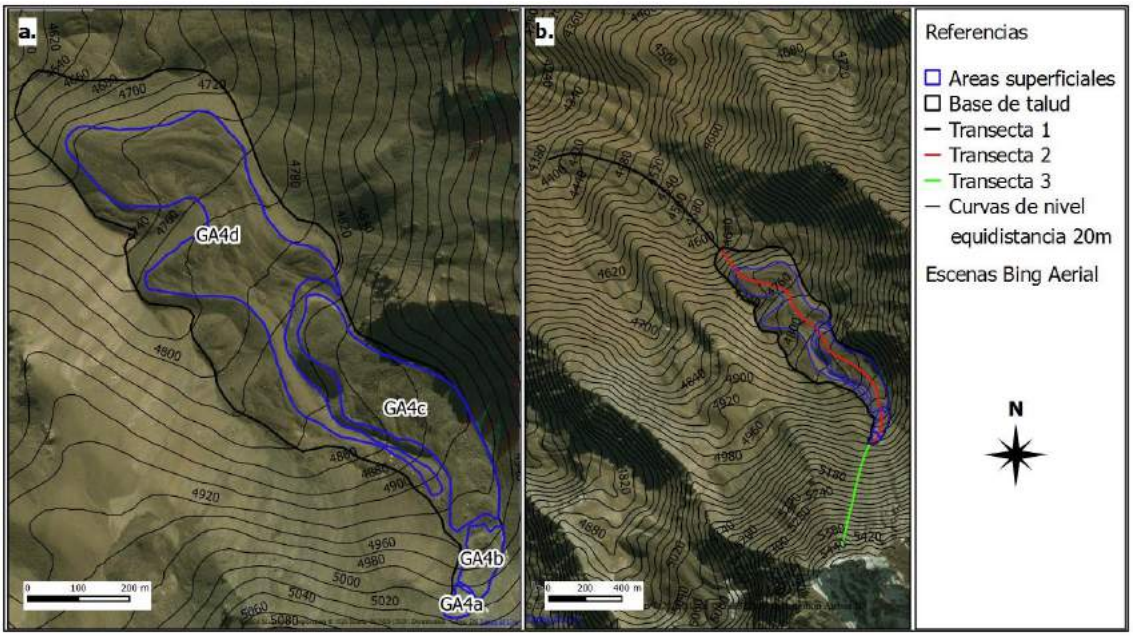


Figura 2. a. Escena Bing Aerial del glaciar de escombros GA4. **b.** Localización de las transectas 1, 2 y 3.

Las transectas en formato .kml fueron transformadas a formato .shp con los softwares Qgis 2.18 y Qgis 3.14, para ser superpuestas sobre la capa de curvas de nivel con

equidistancia de 20 m. Con la herramienta intersección se extrajeron las coordenadas y cotas de los vértices donde las curvas de nivel se cruzan con las transectas. La reconstrucción experimental aproximada de fondo de valle cubierto por el glaciar de escombros se realizó a través de una función polinómica de quinto grado definida en base a los valores acotados de las transectas 1 y 3 "ver Ec. (1)". La función polinómica obtenida, será mucho más precisa cuanto más precisos sean los valores obtenidos en los relevamientos.

$$y = -1{,}31775445226062^{-14}.x^5 + 1{,}07873852869301^{-10}.x^4 - 2{,}50519433128704^{-7}.x^3 + 0{,}000180788710792967.x^2 + 0{,}182015264872462.x + 4382{,}77665555849 \quad (1)$$

y: Cotas aproximadas de fondo de valle cubierto por el glaciar de escombros
x: Distancias acumuladas de la transecta 2 sobre el glaciar de escombros.

Con las cotas obtenidas y las distancias acumuladas de las transectas, se configuró un perfil longitudinal con el asistente de gráficas del software Excel "ver Fig. 3".

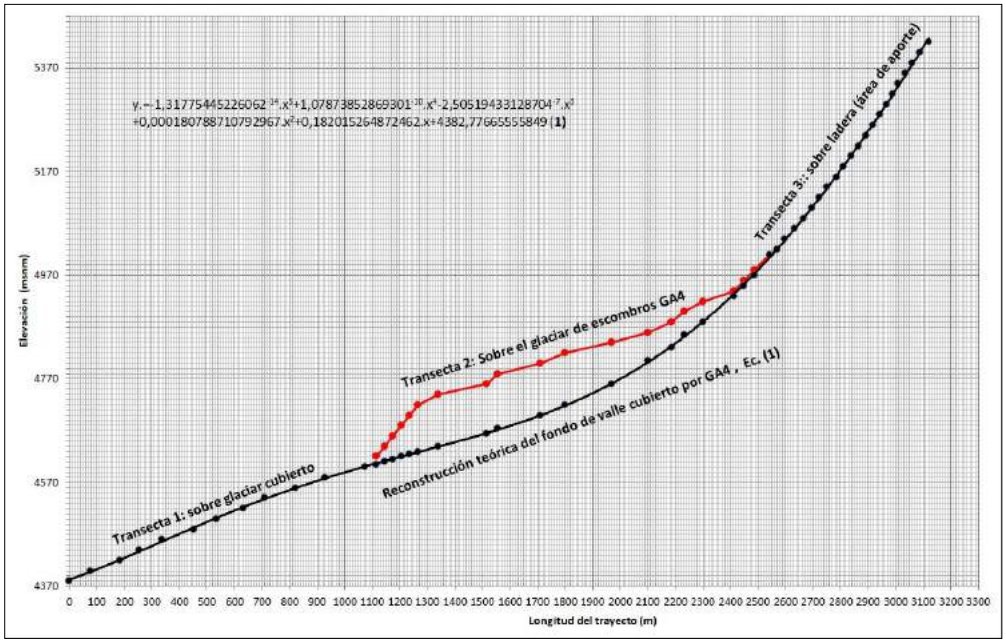


Figura 3. Perfil longitudinal conformado por las transectas 1, 2 y 3 y el perfil teórico de fondo de valle. **(1)** Función polinómica de quinto grado.

Con la herramienta de interpolación del software Qgis 3.14 teniendo como entrada la capa de curvas de nivel se obtuvo la superficie TIN (Red Irregular de Triángulos) "ver Fig. 4a", que representa la superficie del glaciar con resolución espacial de 5m. Posteriormente, con la herramienta diferencia se extrajeron las curvas de nivel externas al polígono de glaciar, obteniéndose así una nueva capa. Se extrajeron los vértices de la nueva capa de curvas de nivel y se incorporaron los puntos que representan el fondo aproximado del valle, logrados mediante la función polinómica. De esta manera se obtuvo una nueva capa de curvas de nivel, que representan la superficie basal del glaciar o superficie de fondo de valle. Empleando nuevamente la herramienta de interpolación sobre la nueva capa obtenida, se obtuvo la superficie TIN-2 "ver Fig. 4b", que constituiría la superficie basal del glaciar.

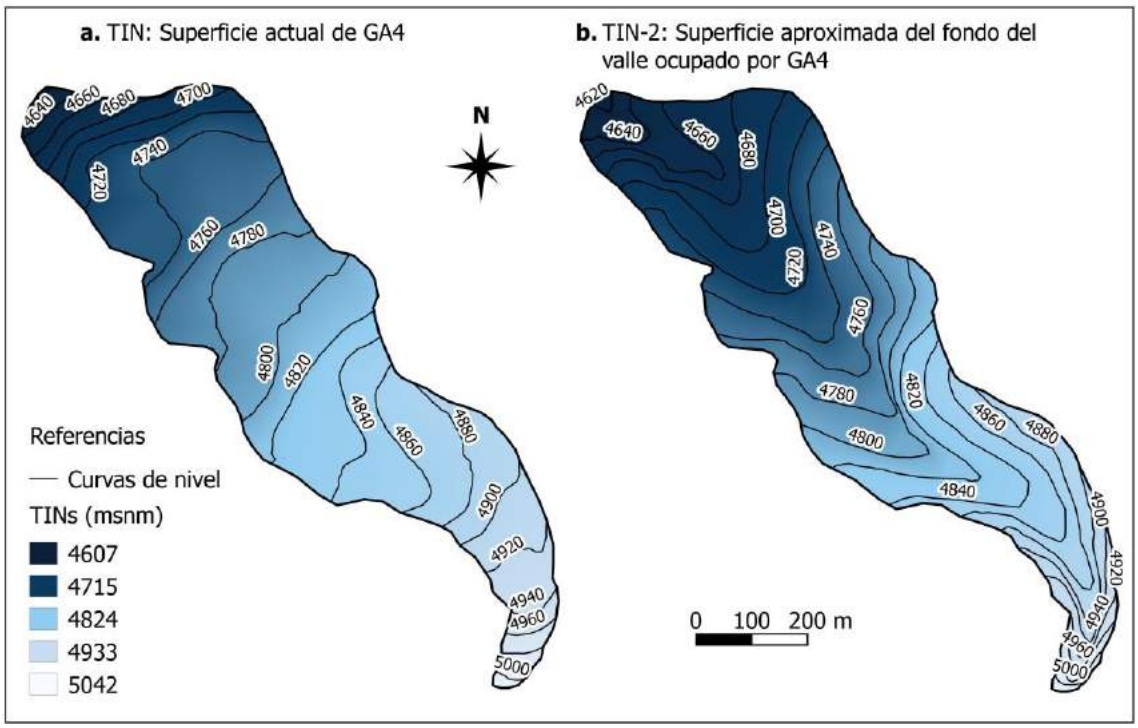


Figura 4. a. Representación de la superficie actual del glaciar (TIN). **b.** Representación de la superficie aproximada del fondo de valle (TIN-2).

Aplicando una operación matemática (diferencia) con la calculadora raster entre el TIN y TIN-2 pudo determinarse el volumen experimental aproximado de GA4.
Para obtener un valor de referencia con el cual comparar los valores obtenidos con esta metodología, se aplicó la función empírica de ley de potencia "ver Ec. (2)", utilizada para el cálculo de espesores en glaciares de escombros de Brenning (2005):

$$t\ (m) = 50 \times [a\ (km^2)]^{0,2} \quad (2)$$

t= espesor
a= área del glaciar de escombros

Esta función empírica en aplicable a cualquier glaciar de escombros singular Brenning (2005). En el caso del glaciar GA4, como es un glaciar multiunidad se calcularon los espesores y volúmenes de cada unidad por separado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la metodología experimental aproximada propuesta se obtuvo un volumen de 9.511.069,17 m^3, con un espesor medio de 32,8 m. El espesor aproximado mínimo es de 10m y el máximo 80m. La Figura 5 muestra el mapa isópaco con la distribución espacial de los espesores en el cuerpo del glaciar de escombros GA4.

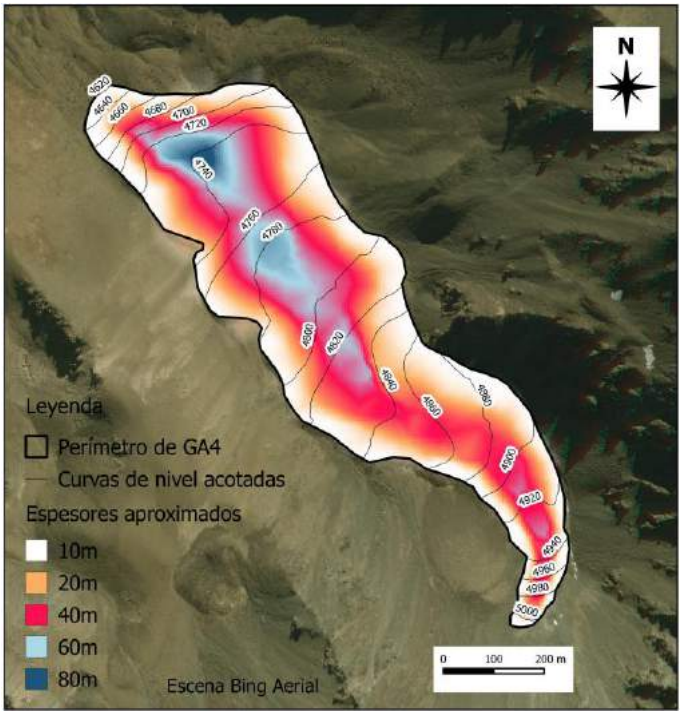


Figura 5. Mapa isópaco del glaciar de escombros activo GA4.

Con la aplicación de la formula exponencial de Brenning (2005) se obtuvo un volumen total de 8.979.031,69 m^3, con espesores medios de 35,64m, 29,65m, 20,21m y 14,84m.
Estos resultados muestran una diferencia de volumen al comparar ambas metodologías de 532.037,48 m^3, lo que representa el 5,59% del volumen obtenido por la metodología propuesta.
Teniendo en cuenta el incremento de la temperatura en la alta cuenca en las últimas décadas, se ha considerado para el cálculo de contenido de hielo el 40% del volumen total. Si se toma el valor medio de los volúmenes obtenidos, el contenido de hielo sería de 3.698.020,17 m^3.
Para la aplicación de esta metodología es necesario tener un conocimiento amplio de la geomorfología de la cuenca donde se emplaza el glaciar de escombros en estudio, la misma ha sido probada en protalus y en menor medida en glaciares de valle. Puede ser aplicada a glaciares que no presenten demasiada complejidad morfológica y dimensiones no muy extensas. En el caso de la región en estudio GA4 sería uno de los glaciares de valle más representativos.
El estudio del glaciar GA4 fue realizado con un DEM del satélite Alos Palsar, con el apoyo del aplicativo Google Earth, que permite, a través de su herramienta de navegación, visualizar estas geoformas desde diferentes ángulos. En el caso de GA4, al ser un glaciar ubicado en un sitio de difícil acceso, no se cuenta con un estudio morfológico más detallado a campo. Para cubicar con mayor certeza estas geoformas es necesario realizar relevamientos topográficos con estación total o GPS geodésicos, como así también realizar estudios de sísmica o geoeléctricos para evaluar su volumen y contenido de hielo.
El modelado del glaciar de escombros fue realizado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 20 m. Con la resolución espacial del satélite Alos Palsar pueden obtenerse curvas de nivel con equidistancia de 10m, lo que permitiría ajustar el modelo.

CONCLUSIONES

La metodología experimental propuesta ha permitido calcular en forma aproximada el volumen, espesores y contenido de hielo de un glaciar de escombros.
Ha sido comparada con la función exponencial de Brenning (2005), dando un error de 5,59% para el caso del glaciar de escombros GA4.

REFERENCIAS

Arenson, L., Hoelzle, M., Springman, S. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. Permafr. Periglac. Process. 13 (2), 117–135 (2002).

Ahumada, A.L. El Calentamiento Global y sus manifestaciones en la Criósfera de las Altas montañas del Norte Argentino. Edición Especial, Boletín Geográfico 30: 57-69 (2007).

Ahumada, A.L., Ibañez Palacios, G.P., Toledo, M.A. El Permafrost de Montaña en el Trópico Argentino. XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba (2014).

Ahumada, A.L., Ibañez Palacios, G.P., Toledo, M.A., Saccone, P., García, A.K., Páez, S.V. y González Díaz, L.N. 2017. La criósfera en el noroeste argentino. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (Eds.), Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán: 851-872. ISBN: 978-987-42-6666-8 (2017).

Corte, A. The hydrological significance of rock glaciers. Journal of Glaciology, 17: 157-158 (1976).

Barsch, D. Eine Abschätzung von Schuttproduktion und Schutttransport im Bereich aktiver Blockgletschere der Schweizer Alpen. Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Suppl. Bd. 28, 148–160 (1977a).

Barsch, D. Nature and importance of mass wasting by rock glaciers in alpine permafrost environments. Earth Surface Processes 2, 231–245 (1977b)

Barsch, D. The problem of the ice-cored rock glacier. Giardino, J.R., Shroder, J.F., Vitek, J.D. Eds., Rock Glaciers. Allen and Unwin, London, pp. 45–53. (1987).

Barsch, D., 1996. Rock glaciers. Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer, Berlin, 331 pp. (1996).

Bianchi, A. R., Yañez, C.E., Acuña, L.R. Base de datos mensuales de precipitaciones del noroeste argentino, Proyecto Riesgo Agropecuario: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro regional Salta-Jujuy (2005). https://inta.gob.ar/documentos/isohietasanuales-del-noroeste-argentino

Brenning A. La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la Cordillera de Santiago: fundamentos y primeros resultados. Revista de Geografía del Norte Grande 30: 7–22 (2003).

Brenning A. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: combining statistical modelling and field mapping. Ph.D. Dissertation, Humboldt Universität zu Berlin. Electronic Publication, kobv: 11-10049648 (2005).

Calkin, P.E., Haworth, L.A., Ellis, J.M. Rock glaciers of central Brooks Range, Alaska, USA. In: Giardino, J.R., Shroder, J. F., Vitek, J.D. Eds.: Rock Glaciers. Allen and Unwin, London, pp. 65–82 (1987).

Fox, A. y Strecker, M. Pleistocene and modern snowlines in the Central Andes (24-28°S). Garleff, K. y Stingl, H. (editores), Sudamérica Geomorphologie un Paläoökologie im Jungeren Quatär. Bamberger Geographische Schriften Bd 11: 169-182 (1991).

González Bonorino, F. Descripción Geológica de la hoja 12c (Aconquija), Catamarca-Tucumán: Buenos Aires, Argentina, Dirección Nacional de Minería, Boletín 75, 51p (1951).

Haeberli, W. Creep of mountain permafrost; internal structure and flow of alpine rock glaciers.

Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Nr. 77: 142 p., Zurich. (1985).
Haeberli, W. Pilot analysis of permafrost cores from the active rock glacier Murte`l I, Piz Corvatsch, Eastern Swiss Alps. Versuchanstalt Wasserbau Hydrologie Glaziologie ETH, Zürich, Arbeitshefte 9, 38 pp (1989a).
Hamilton, S.J., Whalley, W.B. Preliminary results from the lichenometric study of the Nautárdalur rock glacier, Tröllaskagi, Northern Iceland. Geomorphology 12, 123–132 (1995).
Humlum, O. Rock glacier appearance level and rock glacier initiation line altitude: a methodological approach to the study of rock glaciers. Arctic and Alpine Research 20, 160–178 (1988).
Humlum, O. Origin of rock glaciers: observations from Mellemfjörd, Disko Island, central West Greenland. Permafrost and Periglacial Processes 7, 361–380 (1996).
Humlum, O. Active layer thermal regime at three rock glaciers in Greenland. Permafrost and Periglacial Processes 8, 383–408. (1998).
Humlum, O. The geomorphic significance of rock glaciers: estimates of rock glaciers debris volumes and headwall recession rates in West Greenland. Geomorphology 35 41-67 (2000).
IPCC.Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group 1 Contribution to the IPCC 5th Assessment (2013). http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.
Jacob, M. Debris-covered glaciers in the Sierra Nevada, California, and their implications for snowline reconstructions. Quaternary Research 42, 356–358 and 359–362 (1994).
Köppen, W. Grundriss der klimakunde, Walter de Gruter Co. XII 388 pp., Berlín und Leipzig (1931).
Minetti, J. El clima en el Noroeste Argentino. Editorial Magna 440 p., Tucumán (2005).
Strahler, A. Geografía física: Barcelona, España, Ediciones Omega, S.A., 765 pp. (1974).
Trombotto, D. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 21 (112), 33-55 (2000).
Trombotto, D. y Ahumada, A.L. Los Fenómenos Periglaciales. Identificación, determinación y aplicación. Ópera Lilloana 45, 131p., Tucumán. ISSN 0078-5245 (2005).
Wahrhaftig, C., Cox, A. Rock glaciers in the Alaska Range. Geological Society of America Bulletin 70, 383–436 (1959).

RECURSOS GEOMORFOLÓGICOS CON POTENCIAL GEOTURÍSTICO EN LA ZONA DE VILLA PEHUENIA, NEUQUÉN

Toscani F. [a] *y Jurio E.M.* [b]

[a]*Departamento de Geología y Petróleo, FAIN, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Geografía, FAHU, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA*

e-mail: [a] toscani.franco1@gmail.com [b] ejurio@gmail.com

RESUMEN

El Circuito Pehuenia es un recorrido turístico que une las localidades de Villa Pehuenia y Moquehue, el lago Ñorquinco y la ciudad de Aluminé. La zona posee un amplio y variado abanico de elementos geomorfológicos donde destacan las geoformas glaciales y volcánicas. Pese al rico patrimonio geomorfológico de la región, el geoturismo es una veta aún no desarrollada por la industria turística. El presente trabajo busca dar a conocer y poner en valor elementos geomorfológicos con potencial turístico, así como proporcionar una herramienta para la sustentable utilización y gestión de los mismos. Para ello se aplicó un método semicuantitativo que permitió obtener valores intrínsecos, añadidos y de uso y gestión para los diferentes Lugares de Interés Geomorfológico (LIG) seleccionados. A partir de estos valores se elaboran gráficos y mapas a la vez que se realizan recomendaciones y conclusiones sobre dichos LIG. Los datos obtenidos mostraron que existe un potencial turístico alto en cinco de los seis diferentes lugares de interés geomorfológico evaluados y un potencial turístico medio en uno de los mismos. De los valores globales (valores intrínsecos + añadidos + de uso y gestión) el más alto pertenece al cerro Batea Mahuida y el más bajo a la cueva Chenque. Cabe mencionar también que el conocimiento y puesta en valor de estos recursos geomorfológicos resultan elementos esenciales tanto para el desarrollo de actividades turísticas como para la correcta concientización y conservación de los mismos por parte de la sociedad.

Palabras Clave: Circuito Pehuenia, Geoturismo, Lugares de Interés Geomorfológico, Potencial Turístico.

INTRODUCCIÓN

La provincia del Neuquén posee un altísimo potencial de recursos turísticos geológicos y geomorfológicos aún no conocidos ni utilizados en el desarrollo de esta actividad. Todavía son escasos los estudios y proyectos destinados específicamente a la valoración, protección y gestión de los lugares de interés geomorfológico. A partir de esta problemática se plantea el estudio del denominado turísticamente como Circuito Pehuenia (Fig. I), que comprende las regiones que bordean los lagos Aluminé, Moquehue y Ñorquinco en el departamento Aluminé, provincia del Neuquén (Argentina). La belleza de los paisajes, de origen glacial y volcánico principalmente, ha posicionado a esta área entre los principales destinos turísticos de la provincia, con un marcado y sostenido crecimiento. A partir de ello, se propone como objetivo de este trabajo dar a conocer y poner en valor elementos geomorfológicos con potencial turístico, así como proporcionar una herramienta para la sustentable utilización y

gestión de los mismos. Considerando la importancia de hacer un uso correcto de estos recursos, surge el interés de inventariarlos y valorarlos, con el objetivo de potenciar el desarrollo del turismo científico y educativo, además del recreativo.

En el presente trabajo se realiza la caracterización e interpretación de elementos geomorfológicos, y por otro lado, se valoran seis Lugares de Interés Geomorfológico (LIG) seleccionados por sus características geológicas y geomorfológicas. La metodología aplicada se basa en la propuesta elaborada por González Trueba y Serrano Cañadas (2008) y modificada por González Amuchástegui et al. (2014). Se complementó con la recopilación y análisis y bibliografía y antecedentes además del reconocimiento de campo.

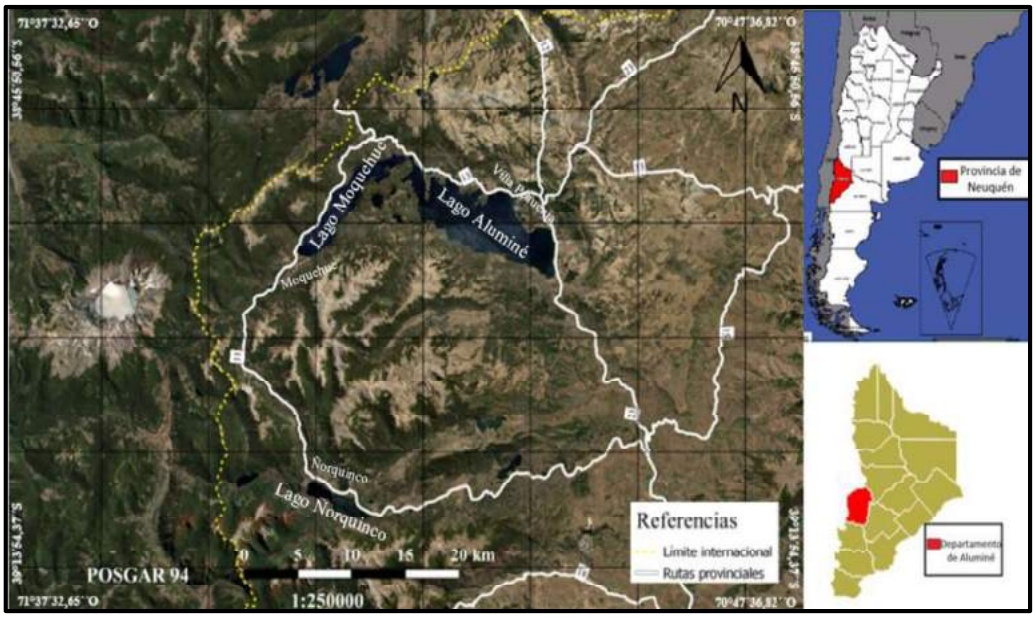


Fig I. Ubicación del área de estudio con imágenes satelitales de Qgis y mapas de la provincia del Neuquén y la República Argentina.

Caracterización del área de estudio

El área de estudio corresponde al extremo norte de los Andes Patagónicos Septentrionales, desde un punto de vista geotectónico. Esta zona se vio fuertemente afectada por el alzamiento de la Cordillera de los Andes asociado a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana durante el Cretácico superior. Este suceso dio lugar a la formación de múltiples cordones montañosos y a la creación de diversos aparatos volcánicos en la zona.

La geomorfología del área de estudio es producto de diversos procesos cuaternarios principalmente de origen volcánico y glaciar, y en menores medidas eólico, fluvial y gravitacional (González Díaz y Di Tommaso, 2010). Las geoformas volcánicas, como la meseta basáltica de Lonco Luan, las disyunciones columnares de Ñorquinco y las múltiples coladas volcánicas, están asociadas a importantes flujos lávicos de edad predominantemente del Plioceno-Pleistoceno. Con respecto a las geoformas glaciares, las mismas constituyen gran parte de los elementos paisajísticos del área de estudio, siendo el modelado glacial el principal responsable de la geomorfología actual en la zona. Esto se debe a que las glaciaciones del Cuaternario han tenido un efecto modelador de la topografía terciaria, degradando gran parte de las geoformas previas en el terreno. Se pueden

reconocer artesas, lagos de origen glacial, aristas, circos y depósitos morénicos junto a rocas aborregadas de diferentes dimensiones.

METODOLOGÍA

Este trabajo tiene como finalidad la caracterización e interpretación de elementos geomorfológicos en la región de Villa Pehuenia, así como la valoración de los diferentes LIG como elementos geoturísticos. Para dicha valoración se optó la metodología propuestas por los autores González Trueba y Serrano Cañadas (2008) teniendo en cuenta las modificaciones realizadas por González Amuchástegui et al. (2014).

Este método consiste en evaluar los Lugares de Interés Geomorfológicos desde una perspectiva científica, cultural y turística. Esto se logra a partir de una triple evaluación (intrínseca, añadida y de uso y gestión) (Tabla I). Para cada una de las instancias evaluativas los posibles valores que se pueden obtener, así como los parámetros a evaluar, fueron de elección propia teniendo en consideración los antecedentes estudiados y las características del área de estudio. Posteriormente se realiza una valoración global (Tabla II) de los LIG cuyo resultado se encuentra asociado directamente con el potencial geoturístico del LIG.

Las limitaciones del método radican principalmente en el grado de subjetividad que pueda presentar, dado que parte de los parámetros evaluados poseen un carácter más cualitativo que cuantitativo. Estos parámetros se encuentran fundamentalmente asociados a aquellos valores añadidos, de uso y gestión. Sin embargo, dicha subjetividad se puede mitigar a partir de un enfoque interdisciplinario basado en el trabajo en conjunto con otros profesionales, entre ellos biólogos, antropólogos, geógrafos.

Tabla de evaluación de los Lugares de Interés Geomorfológico (LIG)

Identificación	Nombre:		Lugar:
Situación	Coordenadas geográficas		Altitud:
Tipo de lugar de interés geomorfológico	Lugar representativo (hace referencia a los tipos de procesos geomorfológicos representativos del LIG)		Valoración
Valores Intrínsecos	Génesis		Máximo 12
	Morfología	Formas de erosión	Máximo 6
		Formas de acumulación	Máximo 6
	Dinámica	Procesos heredados	Máximo 6
		Procesos actuales	Máximo 6
	Estructuras	Sedimentarias	Máximo 6
		No sedimentarias	Máximo 6
Valores Añadidos	Valoración paisajística y estética		Máximo 6
	Elementos Culturales	Significación de elementos culturales e históricos	Máximo 4
		Contenido histórico y cultural	Máximo 4
	Elementos Didácticos	Valor como recurso pedagógico	Máximo 8
	Elementos Científicos	Significación científica.	Máximo 6
		Representatividad científica	Máximo 6
		Rareza científica.	Máximo 6

	Contenido Turístico	Contenido turístico real: considerando todos los valores añadidos anteriores.		Máximo 4
		Atracción turística (potencial)		Máximo 4
Valoración de uso y gestión	Estado de conservación del lugar por efectos antrópicos			Máximo 8
	Estado de conservación de la geoforma por efectos naturales			Máximo 8
	Riesgo de degradación	Factores antrópicos	Impactos	Máximo 4
			Tipo e intensidad de uso	Máximo 4
		Factores Naturales	Amenazas externas naturales	Máximo 4
			Propiedades intrínsecas	Máximo 4
	Potencial de uso	Accesibilidad		Máximo 4
		Frecuentación turística		Máximo 4
		Valor intrínseco		Máximo 4
		Valor añadido		Máximo 4

Tabla I. Tabla de evaluación de los Lugares de Interés Geomorfológico (LIG)

Valoración Global

Valor intrínseco	**Valor añadido**	**Valor de uso y gestión**	**Valor total o global**
Muy alto (>36)	Muy alto (>36)	Muy alto (>36)	Muy Alto (>36)
Alto (25- 36)	Alto (25-36)	Alto (25-36)	Alto (25-36)
Medio (12-24)	Medio (12- 24)	Medio (12- 24)	Medio (12- 24)
Bajo (<12)	Bajo (<12)	Bajo (<12)	Bajo (<12)

Tabla II. Tabla de valoración global

Lugares de Interés Geomorfológico (LIG)

Cerro Batea Mahuida: representa un punto de observación panorámico de geoformas principalmente de origen glaciar (Fig. II). Hacia el oeste se reconocen rasgos de erosión tales como aristas y circos mientras que los lagos glaciales Aluminé y Moquehue, le otorgan un alto valor al paisaje. En el sector este predominan las morenas y las rocas aborregadas combinadas en una topografía de lomadas y depresiones. Este punto permite además, la visualización panorámica de otros elementos geomorfológicos más distales como diversos aparatos volcánicos (Lanín, Villarica, Llaima) o la meseta basáltica de Lonco Luan, claro ejemplo del proceso de inversión del relieve. El acceso al cerro Batea Mahuida se encuentra a la salida de Villa Pehuenia, sobre la Ruta Provincial N°13, actualmente cuenta con infraestructura y su aprovechamiento y gestión está en manos de la comunidad Mapuche Puel, lo que le otorga un plus a su valor turístico.



Fig.II. Vista del paisaje desde mirador de “Las Antenas”.

Cerro Impodi: representa un punto de observación panorámica, en el que se divisan geoformas a gran escala correspondientes a extensos abanicos aluviales asociados al cerro Impodi (Fig. III). Dicho punto de observación se encuentra sobre la Ruta Provincial N°11 y desde allí se pueden reconocer dos grandes cuencas con afloramientos rocosos afectados por proceso de crioclastismo en la parte superior y la formación de abanicos producto de la depositación aluvial al pie del cerro.



Fig.III. Abanico aluvial observado desde la ruta 11.

Cascada Impodi: constituye un salto vertical de agua de aproximadamente 120 metros de altura (Fig.IV), ubicada a la salida de Moquehue, próxima al cerro Impodi sobre la Ruta Provincial N°11. Su origen se explica por la presencia de un valle colgante, de origen glacial, tributario del glaciar principal que ocupó la artesa mayor. Este LIG se puede observar desde la ruta, desde la base o con cierta dificultad, ascender hasta la parte superior, desde donde se obtiene una hermosa vista panorámica del área.

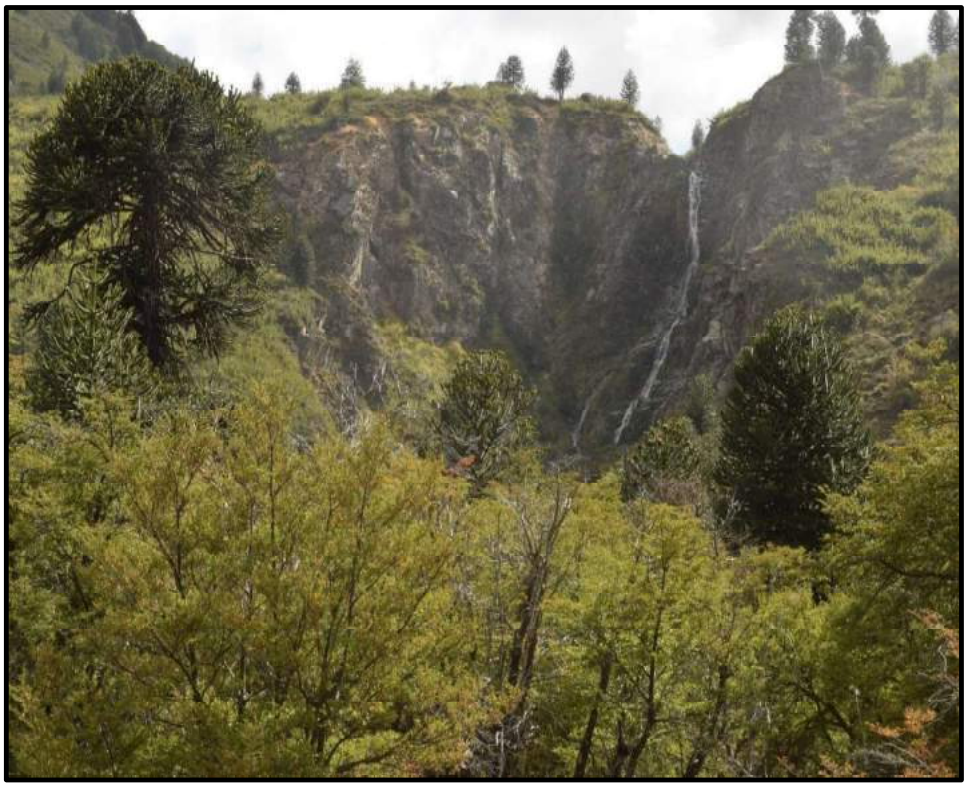


Fig. IV. Vista del valle colgante en la cascada Impodi desde el mirador de la base.

Disyunciones columnares: este LIG está asociado a grandes disyunciones columnares basálticas, denominadas comúnmente por los lugareños como "Farallón Cresta de Gallo" (Fig. V), las cuales se caracterizan por poseer una gran extensión areal e imponentes alturas de más 200 metros. El origen de estas estructuras se asocia a un enfriamiento rápido producto del contacto del magma con un cuerpo de agua o hielo. Se observan además, en la base de ciertos sectores del paredón, bloques caídos asociados a procesos actuales de remoción en masa del tipo caída lo que constituye un ejemplo representativo y didáctico para comprender procesos geomorfológicos gravitacionales.



Fig.V. Vista panorámica de los paredones con disyunciones columnares.

Cueva Chenque: es una cavidad natural poco visitada por turistas aunque muy conocida por los locales (Fig.VI). El acceso a la misma se encuentra a 10 metros de la Ruta Provincial N°11 siguiendo un sendero poco marcado y algo pronunciado a orillas del lago Ñorquinco. Se encuentra por debajo de un amplio bosque con potencial para el desarrollo de futuras instalaciones destinadas al turismo y cuenta con una hermosa vista del Lago Ñorquinco. Como la mayor parte de las cuevas, independientemente de su origen, representa un relevante recurso geomorfológico de interés turístico, además de histórico y cultural debido a que se encontraron en la misma restos arqueológicos como huesos humanos, puntas de flecha, una quitra (pipa tallada en piedra) y huesos de mamíferos utilizados como utensilios (comunicación verbal de Martin Capel, guía de turismo local).



Fig. VI. Vista desde adentro hacia afuera de la Cueva Chenque.

Roca aborregada y bloque errático: este lugar de interés geomorfológico está asociado a geoformas de erosión y acumulación de origen glaciar, se encuentra a 5 metros de la ruta Provincial N°11 camino a Ñorquinco dentro del camping privado Liwen (figura VII). Constituye un sitio fundamental para la comprensión del modelado glaciar sobre el paisaje en el Pleistoceno, puesto que el mismo representa un punto de interés en el fondo de un valle glaciar o artesa evidenciado por la presencia de una roca aborregada muy bien conservada. Este LIG presenta además, surcos, estrías y un bloque errático por encima de dicha roca aborregada, evidencia de la impresionante competencia del glaciar como agente de transporte.



Fig.VII. Roca aborregada con bloque errático en el LIG.

RESULTADOS

Los valores globales muestran que todos los lugares de interés geomorfológico seleccionados poseen valores altos como recursos con potencial geoturístico, a excepción de la cueva Chenque cuya valoración global resulta en un potencial medio. Este potencial medio está fuertemente ligado a los valores bajos obtenidos en la evaluación de uso y gestión asociados principalmente al estado de conservación y los potenciales riesgos de degradación en la cueva.

De los valores obtenidos en la evaluación de uso y gestión se demuestra que en términos generales los LIG evaluados no poseen alto riesgo de degradación, ya sea por factores antrópicos, asociados al potencial desarrollo de actividad turística sustentables en los LIG, o factores naturales, asociados a procesos erosivos y posibles eventos naturales desencadenantes. Sin embargo, la cueva Chenque representa una excepción, dado que el estado de conservación actual y los potenciales riesgos de degradación son parámetros

preocupantes a tener en cuenta. Dicho estado de conservación está asociado a los impactos de la actividad antrópica actual en el lugar (ganadería) y esencialmente a las características intrínsecas de la cueva. Según el presente trabajo, se determinó que la cueva Chenque actualmente no se encuentra en condiciones óptimas para el desarrollo de actividades turísticas in situ, situación que se ve reflejada en el valor medio obtenido para la etapa de evaluación de uso y gestión. El desarrollo turístico actual de actividades en la cueva podría resultar en daños irreparables para el LIG. Sin embargo esto no quita que en un futuro a partir de estudios y toma de medidas de protección, se puedan desarrollar actividades turísticas sustentables.

En función a los resultados obtenidos se realizó un mapa con los diferentes LIG con sus respectivos potenciales como recursos geoturísticos (Fig. VIII). El mapa consta de una imagen satelital donde se colocó un gráfico circular para cada LIG, señalando sus respectivos valores intrínsecos, añadidos y de uso y gestión. Por otro lado, el diámetro del círculo en cada gráfico está asociado al valor global del LIG al que corresponde. Esta imagen representa una herramienta de gran utilidad para el lector, dado que permite una visualización integral de los LIG que contemple tanto la distribución y localización de los mismos como también sus respectivas valoraciones.

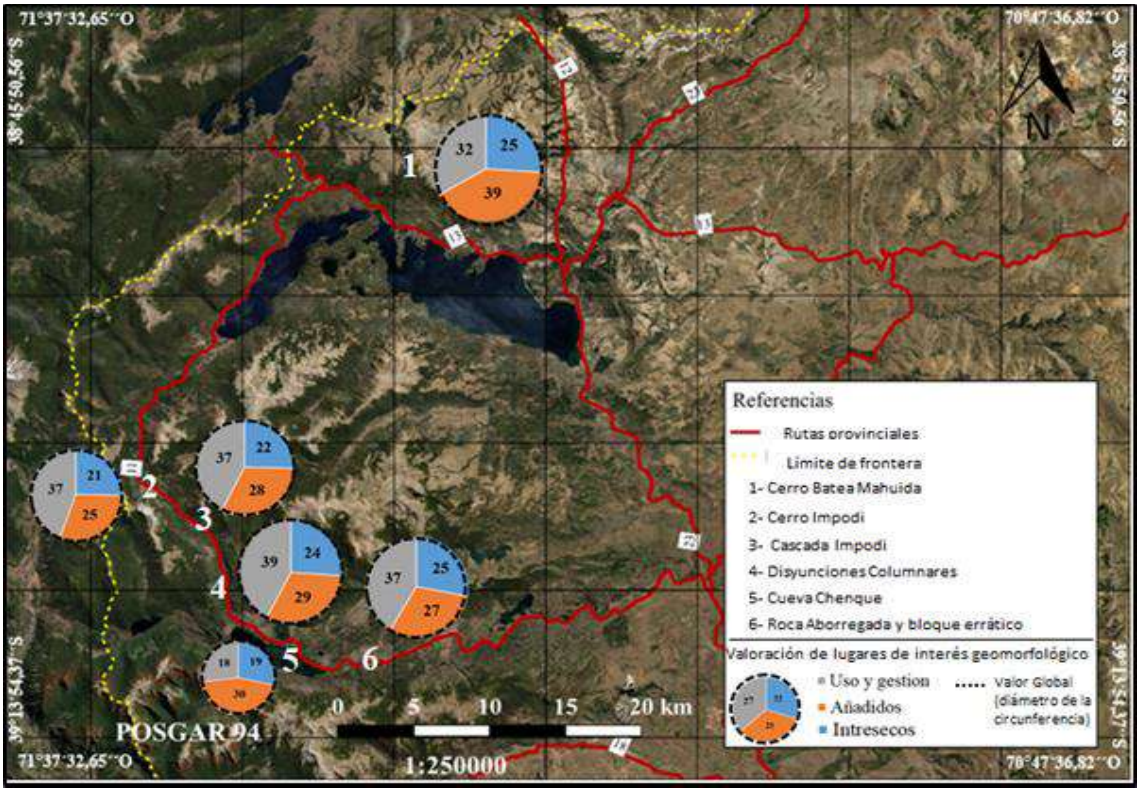


Fig. VIII. Mapa de lugares de interés geomorfológico en la zona de Villa Pehuenia y alrededores, basado en la metodología de Serrano et al. (2009).

Por otro lado, en base a los resultados obtenidos en las valoraciones se elaboró además una georuta (Fig. IX). La misma busca fomentar el desarrollo actual y/o futuro de actividades turísticas destinadas a la utilización de los LIG estudiados en el presente trabajo. Nótese que en la misma no está incluido el LIG denominado cueva Chenque, puesto que como ya

se aclaró con anterioridad, éste no se encuentra en condiciones óptimas para una actual utilización con fines turísticos.

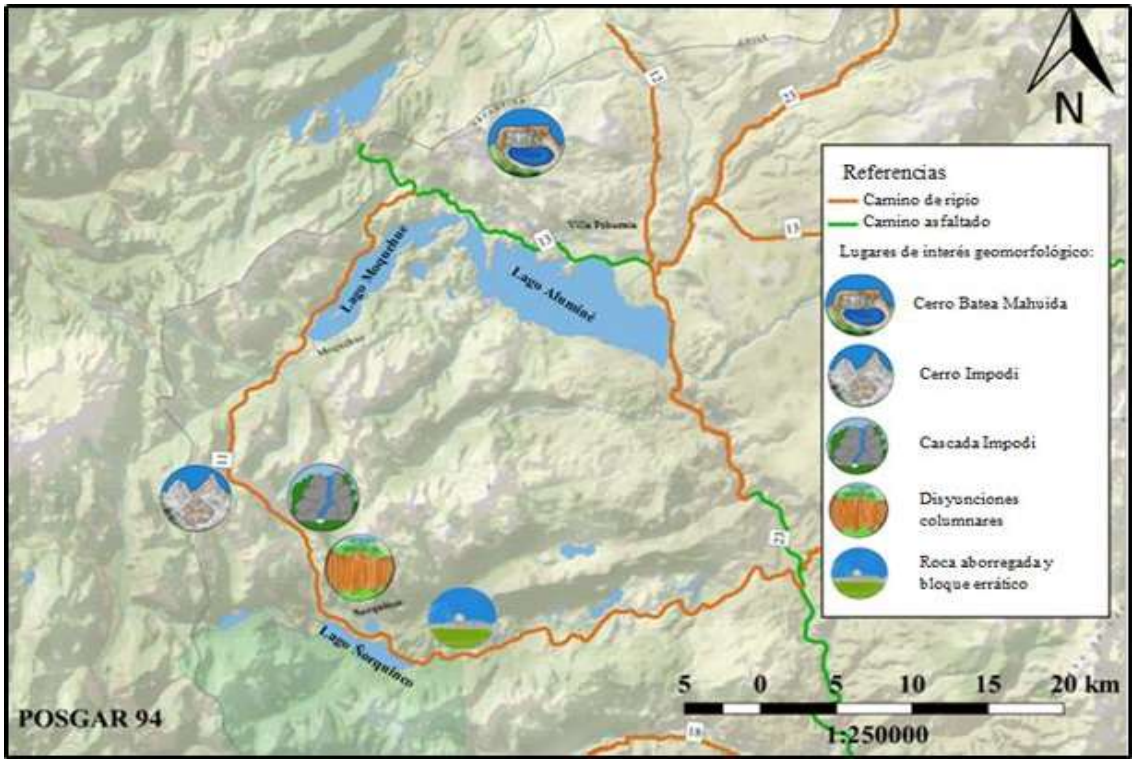


Fig. IX. Georuta propuesta.

CONCLUSIONES

Como conclusión del presente trabajo se puede afirmar que existen múltiples lugares de interés geomorfológico con un alto potencial como recurso turístico, entre los que destacan el cerro Batea Mahuida y las disyunciones columnares. Ninguno de los lugares de interés geomorfológico estudiados muestran valores bajos en las categorías evaluadas (valores intrínsecos, añadidos y de uso y gestión), por lo contrario estos elementos naturales contienen elevados valores como recursos turísticos desde más de una perspectiva. Por lo antedicho se puede confirmar, desde un punto de vista científico, el elevado potencial geoturístico de las regiones que bordean los lagos Aluminé, Moquehue y Ñorquinco. Sin embargo, ninguno de ellos es utilizado en la actualidad por la actividad local, generalmente por desconocimiento o falta de información.

Para mitigar esa falencia, como parte de la comunidad científica podemos estudiar y difundir este tipo de conocimientos geológicos a la sociedad. Dado que las ideas no compartidas son ideas olvidadas. Por otro lado, el presente trabajo pretende ser además de un elemento de divulgación científica, una herramienta útil para el desarrollo del turismo geológico por parte de la población local.

Dado que la actividad económica primordial de la zona está destinada al turismo, es que el conocimiento, puesta en valor y correcta utilización y gestión de los LIG representan un factor adicional para sustento de vida de los lugareños y favorecen el reconocimiento y valoración social de los elementos geomorfológicos como parte del patrimonio natural. Este

tipo de análisis permiten no solo compartir el conocimiento geomorfológico de un lugar, sino también generar conciencia sobre la fragilidad y las medidas de protección para los mismos.

La metodología utilizada se pudo ajustar adecuadamente al área de estudio, permitiendo obtener resultados relativamente objetivos asociados al potencial geoturístico de los diferentes LIG evaluados. A raíz de estos resultados, podemos estimar una elevada potencialidad y efectividad del método para futuros estudios en la zona.

Por último cabe mencionar que el territorio argentino y la provincia del Neuquén, a partir de su historia y características geológicas, poseen una amplia y potencial gama de paisajes y elementos geomorfológicos donde se podrían realizar este tipo de estudios, los cuales permitirían un desarrollo en mayor profundidad de la rama del turismo abocada al patrimonio geológico y geomorfológico.

REFERENCIAS

González Amuchástegui, M.J., Serrano Cañadas, E., Gonzales García, M. Lugares de interés geomorfológico, geopatrimonio y gestión de espacios naturales protegidos: el Parque Natural de Valderejo (Álava, España). Revista de geografía Norte Grande 59. (2014).

González Trueba, J., y Serrano Cañadas, E. La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al parque nacional de los picos de Europa. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles 47. (2008).

Toscani, F; Jurio, E; Decurguez, D. Descripción y valoración de elementos geomorfológicos con potencial geoturístico en la zona de Villa Pehuenia, Neuquén (tesis de grado). Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Neuquén. (2020).

González Díaz, E., y Di Tommaso, I. Geomorfología de la región de los lagos Moquehue y Aluminé: consideraciones acerca de las propuestas calderas Meseta del Arco y Nacimientos del Aluminé Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 66, n3. (2010).

RELACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y PROBLEMÁTICAS EN EL USO DEL TERRITORIO EN HUMEDALES DE LA FRANJA COSTERA, CUENCAS DEL NE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Trovatto, M. M.[a], Balduzzi M. A.[a], Gil J.[a], Salvioli M. L.[b], Cipponeri M.[b], Calvo G.[b]

[a]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, CEIDE, UNLP, ARGENTINA*

[b]*UIDET Gestión Ambiental, Dpto. Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: mmtrovatto@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

En el ámbito de las cuencas de los arroyos Conchitas – Plátanos y Baldovinos, ubicadas en el NE de la provincia de Buenos Aires, se reconoce un acentuado proceso de ocupación antrópica en el sector medio e inferior de las cuencas, y planicie costera del Río de la Plata, lugar donde se ubica la Reserva Costera de Hudson. Las actividades que se desarrollan en el área se abastecen de agua subterránea extraída principalmente del acuífero semiconfinado Puelche (para usos doméstico, agrícola intensivo, industrial y recreativo) y en menor medida, del acuífero Pampeano (uso florihortícola). Con base en el uso de imágenes satelitales, y de registros de profundidad de los niveles de agua subterránea y parámetros físico-químicos in situ, se estudia y analiza la relación del recurso hídrico y la ocupación efectiva del territorio, a través de modelos conceptuales de funcionamiento hidrológico. Se identifica una tendencia creciente, tanto en áreas destinadas a uso residencial con aumento en el número de barrios cerrados, como en la actividad florihortícola bajo cubierta. Este trabajo plantea la necesidad de un control o monitoreo frecuente de la profundidad de los niveles y calidad del agua subterránea, para registrar su evolución y relación con el humedal.

Palabras Clave: Uso del Territorio, Humedal, Monitoreo, Acuíferos

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las cuencas de los arroyos Conchitas – Plátanos y Baldovinos, ubicadas en el NE de la provincia de Buenos Aires, se identifica la ocupación antrópica del territorio, en un proceso que abarca el sector medio e inferior de las cuencas, y en avance hacia la Llanura costera del Río de la Plata.

Con el motivo de caracterizar el agua subterránea y el sistema acuífero en las cuencas mencionadas, y evaluar su evolución temporal en cantidad y calidad, se han desarrollado proyectos de investigación en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo y Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de La Plata, durante los períodos 2013-2014 y 2017-2020, tal como lo acreditan los trabajos de Trovatto et al (2013, 2015), Calvo et al (2014, 2015), y las tesinas de licenciatura, finalizadas (Balduzzi, 2020) y en ejecución.

El agua subterránea en la naturaleza juega un papel fundamental al aportar caudal de base a los ríos, humedales, ecosistemas hídricos, y proporcionar servicios ecológicos de valor social y económico. Desde el punto de vista del hombre es un recurso vital, económico, reserva a largo plazo, y es soporte de servicios de los ecosistemas utilizados (Custodio, 2018).

Para su evaluación resulta necesario el estudio de los insumos que integran el ciclo hidrológico, su identificación e influencia en el sistema, con la precipitación como

componente principal, la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento fluvial, aportado este último en los ambientes de clima húmedo por las precipitaciones y/o el caudal básico de las aguas subterráneas. Este aporte subterráneo se reconoce además en la descarga natural local en humedales o cuerpos de agua superficial, presentes en el área de estudio y descriptos por Deluchi et al (2019). La influencia o predominio de cada uno de los insumos en el ciclo hidrológico se verá modificada a partir de las diferentes actividades antrópicas, tales como la expansión urbana e impermeabilización de los suelos, cambios en la topografía o relieve por construcción de lagunas artificiales, modificación de la traza de cursos superficiales y área de humedales, extracción de agua subterránea por bombeo para abastecimiento público, riego intensivo o bajo cubierta, uso industrial y recreativo. En particular, Aguirre Pacheco (2019) describe la afectación de los humedales y del bosque nativo ribereño, conocido también como Reserva de Hudson.
El objetivo del trabajo es presentar la relación del uso del recurso subterráneo, la ocupación efectiva del territorio (desarrollos inmobiliarios principalmente) y los humedales costeros, a través de un modelo conceptual de funcionamiento con los insumos del ciclo hidrológico intervinientes y su influencia en el sistema en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos empleados incluyeron tareas de gabinete y campo. En las primeras se trabajó en la caracterización climática, geomorfológica, hidrológica superficial y subterránea. Se emplearon imágenes satelitales para identificar los usos del territorio y su relación con el estado de los humedales, además de la planificación de las tareas de campo, tales como el censo de perforaciones y selección de sitios de registro de profundidad del agua subterránea y de parámetros fisicoquímicos in situ. Se consultó la página web interactiva Sentinel Hub, con base en la misión Sentinel-2 L1C y sus 13 bandas, que permite la obtención de imágenes multiespectrales y la realización de filtros de alta resolución. Se efectuó una composición de bandas infrarrojo color (8, 4, 3) para dos posiciones temporales, correspondientes al mes de octubre del año 2015 y octubre del año 2020, con el fin de observar los cambios en la vegetación existente en el área de estudio. En lo que respecta a las tareas de campo, durante el período Mayo-Junio del año 2019 fue realizado el censo de perforaciones y fuentes de agua subterránea preexistentes, tanto en el acuífero libre como en el acuífero semiconfinado infrayacente. Se registraron niveles freáticos y piezométricos en perforaciones de particulares, y se integraron a los datos de niveles de la batería de extracción para abastecimiento público provistos por el Municipio de Berazategui. A partir de la identificación y actualización de los diferentes usos del territorio, la recopilación y análisis de información socioeconómica, demográfica, perfiles geológicos e hidrogeológicos, y la medición e interpretación de niveles de agua subterránea y parámetros fisicoquímicos in situ, se elaboraron modelos conceptuales del comportamiento del sistema geohidrológico. Se conformaron esquemas con las principales unidades hidrogeológicas, considerando los acuíferos someros, representados por el acuífero freático o libre y acuífero semiconfinado, y la unidad acuitarda interpuesta. Se estableció la base del sistema geohidrológico en el piso del acuífero semiconfinado, y como límite superior, la posición de la superficie del terreno, con los principales insumos del ciclo hidrológico.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área comprendida en este trabajo cubre una superficie de 60 km^2 en un ambiente de llanura, que abarca el sector medio e inferior de las cuencas de los arroyos Conchitas-Plátanos y Baldovinos, dentro del partido de Berazategui (ver Fig. 1).

Limita al nor-noreste con el Río de la Plata, al este - sureste con los partidos de Ensenada y La Plata, al sur -suroeste con el partido de Florencio Varela, y al oeste-noroeste con los partidos de Florencio Varela y Quilmes

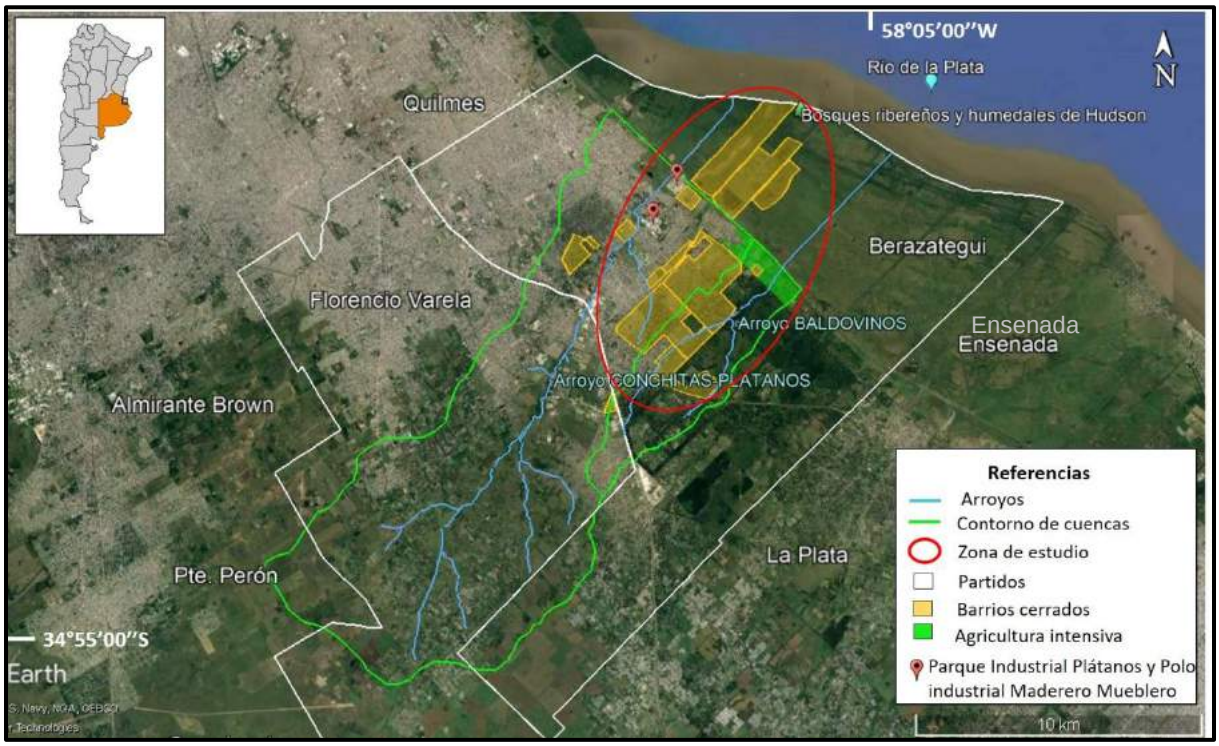


Figura 1: Ubicación de las cuencas Conchitas-Plátanos y Baldovinos

El clima de la región se caracteriza por ser subhúmedo-húmedo mesotermal, con nula o pequeña deficiencia de agua y baja concentración térmica estival; la temperatura media anual es de 16,3 C°, registrada en la estación La Plata Observatorio para el módulo 1909-2019. Las máximas temperaturas se distribuyen en el trimestre diciembre - enero (verano) y las mínimas (invierno) en el trimestre junio - agosto, respondiendo ambas a un patrón estacional. De acuerdo a Balduzzi (2020) la precipitación media anual para el período es de 1049 mm/año y la evapotranspiración real de 793 mm/año con excesos hídricos anuales de 256 mm, distribuidos entre los meses de abril a noviembre, con el máximo medio mensual en julio (46 mm).

Respecto a la geomorfología del área de estudio, se ubica dentro de la subregión Pampa Ondulada, en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, siendo una franja elongada de dirección noroeste-sureste caracterizada por una pendiente topográfica, generalmente menor al 2% (Fidalgo, 1992). Dentro de esta subregión, las cuencas de los arroyos involucrados, de rumbos predominantes suroeste-noreste, están comprendidas en dos grandes geoformas (ver Fig 3): la Llanura Alta (Cavallotto, 2002), también denominada en estudios recientes como Llanura Loéssica (Carol et al., 2017); y la Llanura Costera del Río de la Plata (Cavallotto, 1995) y (Fucks, 2017).

La Llanura loéssica se caracteriza por el modelado fluvial que desarrolló un paisaje ondulado sobre depósitos de loess pampeano. Esta geoforma presenta cotas topográficas de 5 m s. n. m. (metros sobre el nivel del mar) en la zona que limita con la llanura costera, y de 30 m s. n. m. en los sectores de cabeceras de las cuencas. Incluye dos unidades geomorfológicas menores:

- La planicie de inundación de los arroyos, se localiza en sus márgenes y es ocupada por el desborde de las aguas durante grandes lluvias. Se caracteriza por ser alargada con su eje

mayor paralelo a la dirección del escurrimiento superficial, ocupada generalmente por asentamientos urbanos e industriales.

- -El interfluvio convexo ocupa gran parte de las cuencas, se desarrolla entre las planicies de inundación de los arroyos y está constituido por material loéssico.



Figura 2: Principales Unidades Geomorfológicas

La Llanura costera, se extiende en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata entre las cotas de 0 y 5 m s. n. m. Se encuentra ubicada entre la Llanura Loéssica y el Estuario del Rio de la Plata. Está constituida por sedimentos estuáricos-marinos depositados durante los últimos eventos transgresivos-regresivos holocenos de aumento del nivel del mar y dinámica normal del estuario actual, sumado a los eventos extraordinarios de crecida y sudestadas. Presenta áreas deprimidas y bañados (humedales) como también cursos de agua de drenaje anárquico, poco definidos. Se reconocen dos subgeoformas principales:

- la Llanura de marea relictual de mayor representacion areal, se encuentra ubicada hacia el noreste del área de estudio, entre la Llanura Loéssica y la línea de cordones litorales cercanos a la costa. Presenta secuencias sedimentarias de arenas, limos y arcillas, con una superficie plano-cóncava pobremente drenada, y desarrollo de bañados o pantanos no integrados que constituyen en algunos sectores un verdadero hidrótopo cubierto por pajonales (Cavalloto, 1995). Una sucesión de paleolíneas de costa vinculadas al descenso del nivel del mar, presentan una orientación (paralelos a la línea de costa actual) que permite inferir una secuencia progradante hacia el NE. Las mismas contribuyen al anegamiento y déficit de drenaje del agua de los arroyos provenientes de la Llanura Loéssica que drenan hacia el río de La Plata (Fucks et al. 2017). Los arroyos Baldovinos y Conchitas-Platanos se encuentran canalizados para facilitar su drenaje, modificando la dinámica de los humedales. Otro rasgo destacable en cuanto a la litología de la geoforma, es que los depósitos más someros son arcillas plásticas con muy baja permeabilidad, rasgo que contribuye con el anegamiento del agua superficial. Se interpretan como una sucesión de marismas originadas en un medio asociado a los procesos entre la interfase agua dulce-agua salada (Fucks et al, op cit.).

- Cordones litorales, se hallan ubicados paralelos a la playa del Rio de la Plata. Presentan una superficie plana o suavemente convexa y pueden manifestarse como un único cordón de 1 km de ancho o por un conjunto de pequeños cordones individuales. Se formaron por la acumulación de sedimentos transportados por la deriva litoral sureste-noroeste, y se componen fundamentalmente de arenas y conchillas, con desarrollo de vegetación arbórea de Celtis tala (Fucks et al, op cit).

Entre la Llanura costera y la Llanura Loéssica se desarrolla una franja que corresponde al límite entre ambas y dentro de la cual se localizan dos unidades geomorfológicas menores: el Antiguo estuario interior, que son depósitos relacionados a la desembocadura de los arroyos durante el retiro del antiguo mar Holoceno; y la Antigua franja costera representada por montículos aislados de arena muy fina de origen eólico con relieves muy suaves. Ambas unidades ocupan una pequeña porción en comparación con las dos unidades descriptas anteriormente (Cavaloto, 2002 y Fucks, 2017).

Con respecto a la hidrología superficial los arroyos presentan una orientación sudoeste-noreste, con recorrido definido, de forma dendrítica subparalela, y canalizados en su ingreso a la Llanura costera, con sentido de escurrimiento general hacia el Río de la Plata.

Los cursos superficiales conforman su caudal naturalmente con aportes del agua subterránea y de la precipitación, reflejado en un carácter efluente o ganador. En la zona de estudio, esta relación natural cambia a indiferente/ influente, debido a la extracción intensiva del agua subterránea, que modifica el sentido del flujo, con posibilidad de infiltración en tramos del cauce no impermeabilizado. Las aguas superficiales presentan su calidad deteriorada (ver Fig. 4), a partir de vuelcos de efluentes de origen industrial y cloacal, con deficiente tratamiento y riesgo sanitario microbiológico, producidos aguas arriba del área analizada, en coincidencia con Salvioli et al (2013).



Figura 4. Arroyo Conchitas. Aguas abajo Parque Industrial Plátanos, Balduzzi, (2020)

En lo que respecta a la presencia de cuerpos de agua superficial o humedales, Deluchi et al, (op cit 2019) reconocen en la Llanura costera la interacción de humedales costeros y el agua subterránea. En el inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires planteado por la OPDS, (2019), los define como “sistemas que debido a las condiciones geomorfológicas e hidrológicas permiten la acumulación de agua en forma temporaria o permanente, dando lugar a un tipo característico de suelo y/o organismos adaptados a estas características. No tienen una fisonomía vegetal única, ni una fisiografía característica, varían en su expresión

espacial, a distintas escalas, su delimitación en relación a ambientes terrestres o acuáticos, es variable en el espacio y el tiempo". Para la zona de estudio, el humedal ubicado en la Llanura costera es clasificado por la OPDS dentro del grupo Tributarios al Río de la Plata, donde el funcionamiento está dado por las relaciones entre el aporte de agua superficial y subterránea, la geomorfología y la hidrodinámica del sistema (Ver Fig. 5).

a.  b. 

Figura 5. Humedal - Bosque nativo.

En relación a la hidrología subterránea**,** se identifican en la Tabla I las unidades geológicas y su comportamiento hidrolitológico descriptas por González (2005), para la Región Noreste, destacando para el presente trabajo, con mayor detalle a las unidades someras (recuadro violeta).

Tabla I: Unidades geológicas y comportamiento hidrolitológico, Región Noreste (González, 2005)

Unidad geológica	Litología	Comportamiento Hidrolitológico
Pospampeano + Pampeano	Limos, arenas, limos arcillosos, Conchillas	Zona No-Saturada Acuífero (freático)
Pampeano	Limos loessoides, limos finamente arenosos, calcáreos	Acuífero (freático) Acuífero (semilibre)
Pampeano (inferior)	Limos arcillosos, Arcillas limosas	Acuitardo
F. Arenas Puelches	Arenas medianas a finas, ocasionalmente gruesas	Acuífero (semiconfinado)
F. Paraná (superior)	Arcillas verdes, verdes azuladas	Acuícludo
F. Paraná (inferior)	Arenas medianas a finas, marinas	Acuífero (confinado)
F. Olivos (superior) F. Olivos (inferior)	Arcillas rojizas Arenas medianas, gravas basales	Acuícludo Acuífero (confinado)
Basamento hidrogeológico	Basaltos Granitos y gneises	Acuífugo

Las unidades hidrogeológicas correspondientes a sedimentos de edad Pleistocena – Holocena, que alojan al acuífero freático, suprayacen a una unidad Plio – Pleistocena, compuesta por arenas finas a medianas de origen fluvial, que constituye el acuífero semiconfinado Puelches, pasando a limosas hacia la parte superior, con profundidad variable entre 20 y 40 m. Los depósitos de arena se disponen sobre arcillas verdes de origen marino, edad miocena, de comportamiento acuícludo, consideradas en este estudio, como base del sistema analizado.

En la Llanura Loéssica el material aflorante pertenece a la Fm Pampeano (Pleistoceno), conformados por limos loessoides castaño rojizos, con niveles calcáreos y espesores

variables de 20 a 45 m, originados por acción eólica y ácuea (lacustre y fluvial), distribución en forma de manto, con permeabilidad media de 5 m/d.
En el ámbito de la Llanura costera afloran los Sedimentos Postpampeanos (Holoceno), de origen estuárico-marino, con baja permeabilidad y espesores variables entre 2 y 10 m. Existe un material limo-arcilloso interpuesto entre ambos acuíferos, de espesor variable (0 a 5 metros) y comportamiento acuitardo, que permite la transferencia de agua o fenómeno de filtración vertical ascendente o descendente, según la diferencia de carga hidráulica entre el acuífero supra e infrayacente.
Estudios antecedentes en la Llanura loéssica (Trovatto et al. 2013, 2015, ver Fig. 6 a y b) reconocen una dirección de escurrimiento subterráneo o descarga regional suroeste-noreste, con sentido hacia el Río de la Plata.

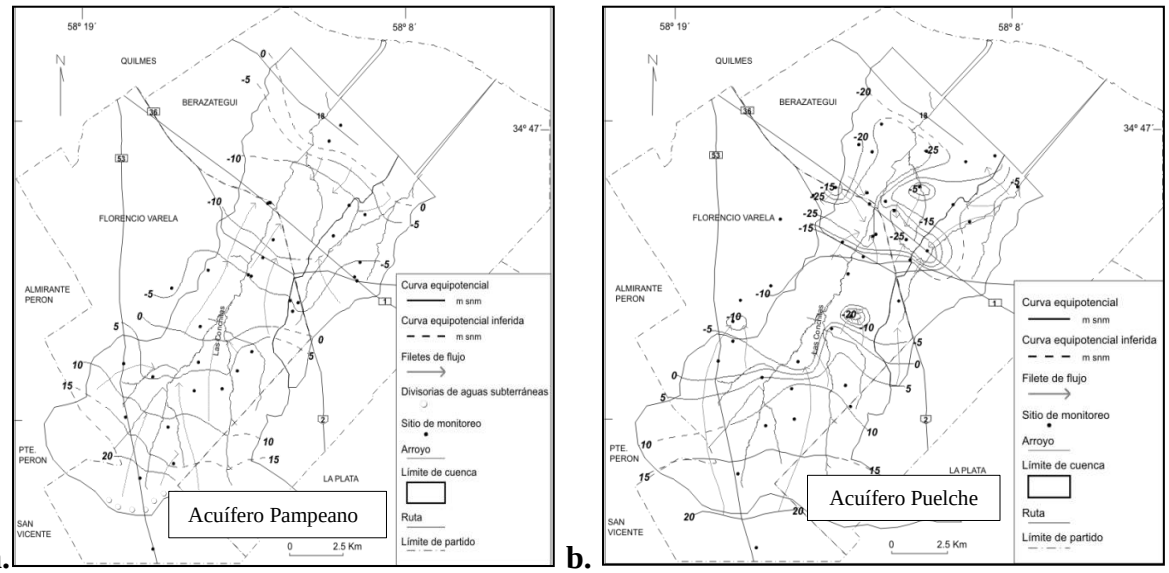


Figura 6: Red de flujo subterráneo: **a**. Acuífero freático. **b**. Acuífero semicofinado (modificado de Trovatto et al, 2013)

La recarga del acuífero freático es autóctona directa, por aporte de los excesos de la precipitación, mientras que en el acuífero semiconfinado la **recarga es indirecta** por filtración vertical descendente desde el acuífero freático. La circulación del flujo subterráneo se modifica, en sentido contrario a la descarga regional (noreste-suroeste), por influencia del bombeo y extracción para abastecimiento público, con generación de varios conos de depresión, donde se alcanzan las mayores profundidades de los niveles.
Se reconoce el avance de la cuña salina hacia el continente y la consecuente entrada de agua salobre /salada, deteriorando la calidad y rendimiento de los pozos de abastecimiento público. Otra consecuencia que trae aparejada el bombeo intensivo del acuífero semiconfinado es la depleción o agotamiento del acuífero freático suprayecente, con profundidades de los niveles cercanas al piso del acuífero (espesor máximo de la zona no saturada).
La caracterización y calidad del agua subterránea contenida en los acuíferos freático y semiconfinado de la Llanura loéssica presentan Total de Sólidos Disueltos (TDS) menor a 1500 mg /l, mientras que en la Llanura costera el TSD en los acuíferos supera los 2000 mg/l.

RESULTADOS

De acuerdo al INDEC (2010), el partido de Berazategui posee una población de 324.244 habitantes, distribuida en una superficie de 188 km^2. En el uso del territorio, se han desarrollado actividades industriales vinculadas a numerosos rubros (metalurgia, papel,

plástico, químicos) distribuidos en tres parques industriales, dos de ellos ubicados en el curso inferior del arroyo Conchitas-Plátanos (Parque Industrial Plátanos y Polo Industrial Maderero Mueblero, ver Fig 1). La otra actividad socioeconómica que ha tomado importancia en el uso del territorio es el desarrollo de emprendimientos inmobiliarios (barrios privados o cerrados), los cuales ocupan una superficie aproximada de 20 km^2, en el sector noreste de la cuenca Conchitas-Plátanos extendiéndose hacia el sector del arroyo Baldovinos, con una alta demanda de servicios, entre ellos el consumo de agua.

A través del trabajo con imágenes (ver Fig. 7) se observa que los tonos rojos vivos corresponden a vegetación sana y vigorosa, donde las masas vegetales reflejan una alta energía en el sector infrarrojo cercano del espectro (banda 8), mientras que los tonos rosados y grises corresponden a vegetación enferma que, como producto del daño en su estructura celular, reduce su reflectancia en el mismo sector del espectro.

a.



b.



Figura 7: a. Octubre de 2015. **b**. Octubre de 2020

Para la posición temporal de octubre de 2020, en comparación con la imagen de octubre del año 2015, se evidencia mayor ocupación en la Llanura costera, movimiento de tierras y construcción de cuerpos lagunares artificiales, asociado al desarrollo inmobiliario, y cambios en la vegetación del bosque costero, en proximidad de estos emprendimientos.

Como resultado del censo de perforaciones (ver Fig.8) se accedió a 21 perforaciones preexistentes, 9 correspondientes al acuífero freático, y 12 vinculadas al acuífero semiconfinado distribuidas en la zona de estudio.
En el acuífero freático o libre**,** la profundidad del agua subterránea presentó valores máximos de 30 mbnt (metros bajo nivel del terreno) en la Llanura Loéssica, y de 3 mbnt en la Llanura costera, asociado este valor a un relieve modificado de relleno aproximado de 2 metros.
La salinidad determinada in situ en la Llanura Loéssica, supera los 1000 mg/L, y con valores de 700 mg/L en la cuenca del arroyo Baldovinos; mientras que en la Llanura costera la medición fue del orden de 5650 mg/L.

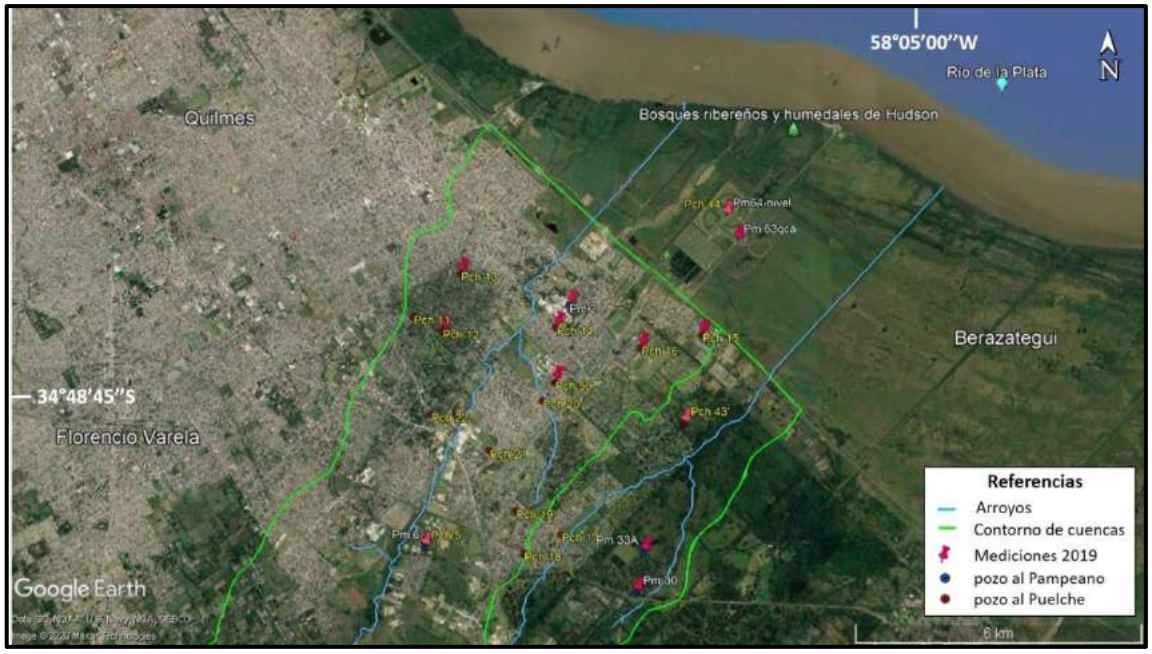


Figura 8: Ubicación de las perforaciones en la zona de estudio

Para el acuífero semiconfinado Puelche, la profundidad del nivel piezométrico en la Llanura loéssica alcanzó valores en el rango de 21 a 31 mbnt, mientras que en la Llanura costera fue de 3 mbnt. La salinidad de este acuífero adquiere valores desde 700 mg/L hasta 3000 mg/L en la Llanura loéssica, mientras que en la llanura costera se registró un valor de 9400 mg/L. Con respecto a la temperatura y el pH, los valores en el rango de 17-18 °C, y de tendencia neutra, respectivamente para ambos acuíferos.
Sobre la base de la información antecedente y los datos registrados durante el año 2019, se presenta en la Fig. 9 a y b el modelo conceptual de funcionamiento para la Llanura loéssica y la Llanura costera. En ambas unidades geomorfológicas se identifica a la precipitación y la evapotranspiración como los insumos principales de entrada y salida natural del sistema. El escurrimiento superficial es alimentado por aporte de precipitaciones y vuelco de efluentes aguas arriba de la zona de estudio, con posible infiltración a lo largo del cauce no impermeabilizado del arroyo.
La posición de los niveles freáticos/piezométricos medidos, refleja la descarga artificial o extracción intensiva por bombeo del acuífero semiconfinado, para las diferentes utilidades antrópicas, generando profundización de los niveles, reflejados en los conos de depresión y provocando agotamiento o proceso depletivo en el acuífero freático suprayacente.
En el modelo de la Llanura costera, los desarrollos urbanísticos poseen un sistema de extracción propio con perforaciones al acuífero semiconfinado, utilizadas para abastecimiento y uso recreativo, previo tratamiento por ósmosis inversa, debido a las

características salobres/salinas. Respecto de las perforaciones en el acuífero libre o freático, son destinadas para control y monitoreo.

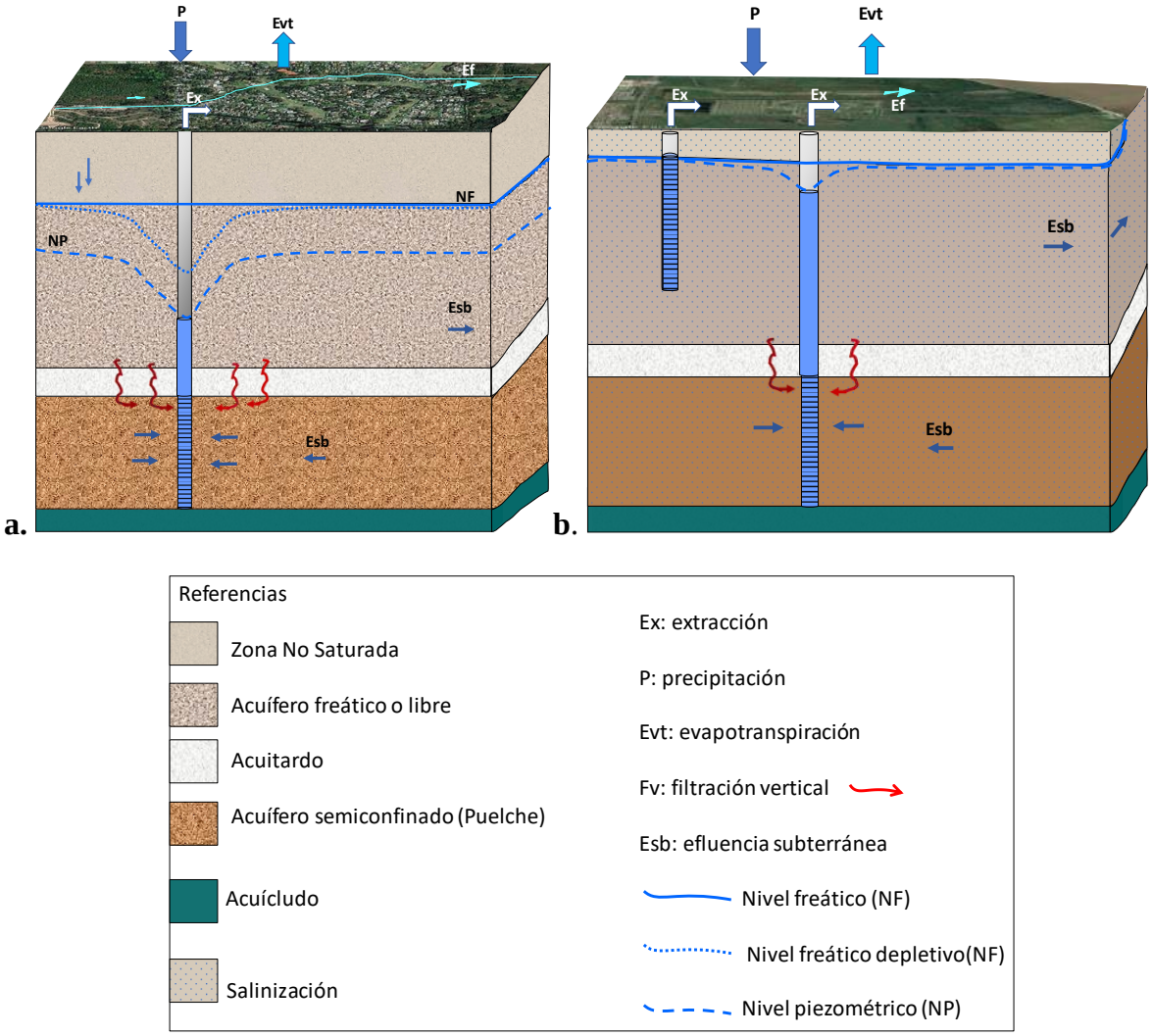


Figura 9: Modelo conceptual **a.** Llanura Loéssica. **b**. Llanura Costera. Fuente: modificado Balduzzi, 2020

De acuerdo con Custodio (2001), las condiciones hidrodinámicas y la distribución de la calidad del agua subterránea que llega a los humedales puede ser modificada por influencia de la explotación intensiva. Frente a lo expuesto, se considera como impacto primario de la extracción sobre la llanura costera y los humedales, la disminución de la descarga de agua subterránea, el descenso del nivel freático y un menor aporte de agua al humedal.

En cuanto a la calidad del recurso hídrico superficial, la degradación deriva de la falta de saneamiento del sector urbano, de las pérdidas y/o vuelcos de efluentes industriales y domésticos, y de la extracción y disposición de agua subterránea salobre/salada en el curso superficial y en cuerpos superficiales.

Aguirre Pacheco (2019), señala la existencia de conflicto socioambiental generado por vulnerar las normas de protección de la selva marginal de Hudson, la ocupación del territorio con desarrollos urbanísticos y sus actividades, con la consecuente degradación del bosque nativo. Es una problemática vigente, en búsqueda de un acuerdo para la preservación del ambiente y la mitigación de los efectos producidos.

CONCLUSION

El análisis e interpretación de la información aportada por las imágenes y los datos censados en el campo permitieron mostrar el estado de situación del recurso hídrico superficial y subterráneo, ésta última como única fuente de abastecimiento en el ámbito de estudio.
Los modelos conceptuales sintetizan la interacción entre la actividad desplegada en superficie y la extracción de los acuíferos, reconociendo principalmente a los desarrollos urbanísticos, y a la agricultura intensiva en menor proporción (cuenca inferior del arroyo Baldovinos), como los principales consumidores, en competencia con los humedales.
A partir de identificar la ocupación del territorio por avance de emprendimientos inmobiliarios sobre áreas sensibles del humedal de la Llanura costera, con empleo de agua subterránea para uso doméstico y recreativo, modificación del relieve y de la traza de cursos superficiales, creación de lagunas artificiales, se reconoce la problemática socioambiental, y se resalta la importancia de monitorear las variables de cantidad y calidad del recurso, y así, detectar en el tiempo los cambios en la profundidad de los niveles y en la calidad del agua extraída, e incorporar un mayor conocimiento de la respuesta y dinámica de los acuíferos, para su mejor gestión.
Es necesario visibilizar la existencia de los diferentes actores sociales presentes en el territorio, entendiendo que existen intereses económicos y sociales que modifican el ambiente, así como también la necesidad de implementar nuevas planificaciones integrales que construyan un acuerdo de valoración del ambiente natural para un desarrollo sostenible, una mejor gestión de los recursos hídricos y un menor de deterioro de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Coordinación de Servicios Sanitarios del Municipio de Berazategui por el aporte de los datos de profundidad de nivel de agua subterránea, correspondientes a la batería de perforaciones ubicada en el ejido urbano, utilizados para la realización del presente trabajo. Así como también agradecemos la predisposición de los profesionales para la interpretación del sistema hídrico y sus relaciones con el territorio.

REFERENCIAS

Aguirre Pacheco, V. S. La degradación ambiental en los Bosques Ribereños de Hudson, provincia de Buenos Aires. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad Nacional de La Plata. VII Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas y XXI Jornadas de Geografía de la UNLP. ISSN 2362-4221 - http://jornadasgeogra_a.fahce.unlp.edu.ar. (2019)

Balduzzi, Marina. “Indicadores sustentables de agua subterránea en pequeñas cuencas del noreste de la provincia de Buenos Aires”. FCNyM-CEIDE-UNLP. Inédita. (2020).

Calvo, G. H., Cipponeri, M., Salvioli, M. L., Trovatto, M. M., y Álvarez, P. Análisis multitemporal del uso efectivo del territorio en la cuenca del arroyo "Las Conchitas-Plátanos". En: I Congreso Latinoamericano sobre Conflictos Ambientales. Buenos Aires. (2014).

Carol, E., Braga, F.,Donnici, S., Kruse, E. Tosi, L. The hydrologic landscape of the Ajó coastal plain, Argentina: An assessment of human-induced changes. *Anthropocene*, 18, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.05.001. (2017)

Cavallotto, J. L. Evolución holocena de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata. Servicio de Hidrografía Naval. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 57. (4): 376-388 Buenos Aires. Argentina. (2002).

Custodio, E. Aguas Subterráneas y Humedales. En: Aguas subterráneas y Medio Ambiente. (Serie C, Nº 1). Fundación Marcelo Botín. ISBN: 84-95516-36-5 (2001).

Custodio, E. Gobernanza y Planificación del Agua Subterránea: Consideraciones de las sequías; resultados de Directiva Marco del Agua Europea. Congreso de ABAS, Campiñas, San Pablo, Brasil. (2018)

Deluchi, M.H., Trovatto, M. M., Laurencena, P., Kruse, E. Particularidades hidrogeológicas de un ecosistema costero. II Congreso de Agua, Ambiente y Energía. CAAE. Montevideo, Uruguay. (2019).

Fidalgo F. Provincia de Buenos Aires continental. En Iriondo M. (ed.) *El Holoceno en la Argentina*. Cadinqua: pp 23-38, Buenos Aires (1992).

Fucks, E., D´amico, G, M. Florencia Pisano y Nuccetelli, G. Evolución geomorfológica de la región del gran La Plata y su relación con eventos catastróficos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 74 (2): 141-154. (2017).

González, N. *Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires*. En R. de Barrio, E. Etcheverry, M. Caballé, & E. Llambías (Eds.). Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires (pp. 359-374). Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, Asociación Geológica Argentina, La Plata, Argentina (2005).

INDEC. Instituto Nacional de Estadística y Censo. Censo Nacional de Población y Vivienda. República Argentina. (2010)

Manzano, M., Borja, F. y Montes, C. Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 313 – 330. (2002)

Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible –OPDS. Inventario de humedales de la Provincia de Buenos Aires. Nivel 2: Sistemas de Paisajes de Humedales – 1ª Ed. – Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. La Plata. (2019).

Salvioli, M., Colli, G. A., Cipponeri, M., y Calvo, G. H. Gestión de cuencas: análisis comparativo en función de la calidad del agua superficial y usos del suelo de dos pequeñas cuencas urbanas. En *VII Congreso de Medio Ambiente. (*2013)

Sentinel Hub, (https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground). (Octubre 2020).

Trovatto, M. M., Álvarez, M. del P., González, N., y Hernández, M. A. *Evidencias hidrodinámicas de explotación intensiva en cuencas del Noreste de la provincia de Buenos Aires*. En: González et. al (eds): "Agua subterránea recurso estratégico". XX-XX. EDULP. ISBN: 978-987-1985-03-6. La Plata. (2013)

Trovatto, M. M., Álvarez, P., Cipponeri, M., Salvioli, M. L., y Calvo, G. H. 2015. *Impacto antrópico sobre el recurso hídrico en cuencas del noreste de la provincia de Buenos Aires*. En XXV Congreso Nacional del Agua, Entre Ríos, Argentina. Libro de resúmenes. (2015).

GEOCHEMICAL AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF THE CHILIQUES VOLCANO

Ureta G.[a,b], Sepúlveda J. P.[a,c], Scheinost A.[a,d], Aguilera F.[a,b,e] and Zimmer M.[f]

[a] *Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico - Ckelar Volcanes, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, CHILE*
[b] *Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, CHILE*
[c] *Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Florence, ITALY.*
[d] *Universidad Católica del Norte, Programa de Doctorado en Ciencias Mención Geología, Antofagasta, CHILE*
[e] *Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta, CHILE*
[f] *Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, GERMANY*

e-mail: g.ureta.alfaro@gmail.com

ABSTRACT

Chiliques volcano is one of the 32 active volcanoes of northern Chile, which constituted an Inca shrine for the performance of rituals of the Atacama native community of Socaire. It is located at 4,551 m a.s.l., close to the Lejía lake and the Cerro Overo maar (77 ka), which is one of the least silicic young volcanic rock of northern Chile. Chiliques occupies an exciting position at the intersection zone of three volcano-tectonic lineaments in the Central Volcanic Zone of the Andes, northern Chile. These volcano-tectonic lineaments correspond to NE-SW trending Altos del Toro Blanco ridge, NNW-SSE trending Miscanti lineament, and NW-SE trending Cordon Puntas Negras chain. The material erupted at Chiliques lies above the Tuyajto Ignimbrite (0.53 Ma), covering the whole area. The magmatic and morphometric characteristics were determined by fieldwork, petrographic, geochemical, and morphometric analyses. Chiliques volcano can be divided into four lava flow units developed mainly towards the north. Petrographically, their products correspond to porphyritic andesites with phenocrysts of clinopyroxene and plagioclase in a groundmass comprising plagioclase, clinopyroxene, hornblende, and hematite. Additionally, in some samples, crystals of olivine and biotite are found subordinately. Geochemically, the Chiliques lavas display a range of 59-63 wt.% SiO_2 with high and low concentrations of Sr and Y, respectively, suggesting that the magma has fractionated garnet ± amphibole in its origin. Morphometric parameters were estimated based on a TanDEM-X 12 m resolution, using the MORLVOC algorithm. Chiliques exhibits an edifice height of 1,473 m, a maximum edifice volume of 25.9 km^3, and a mean slope of the whole edifice of 25°. The petrographic, geochemical, and morphometric characteristics suggest that the Chiliques volcano formation corresponds to the polygenetic activity under compressional control, which has one dominant vent with a magma sourced from partial melting of the mafic continental lower crust (depths ~ 60 km).

Keywords: Central Andes, Altiplano-Puna Volcanic Complex, Stratovolcano, Polygenetic volcanism, Physical volcanology.

INTRODUCTION

Volcanism within the Andean Cordillera is characterized by more than 200 Pleistocene and Holocene volcanoes forming a 7,500 km-long mountain chain along the westerns margin of South America (de Silva and Francis, 1991; Stern, 2004). The Andean range has been divided into four segments namely Northern, Central, Southern, and Austral Volcanic Zones, respectively (Thorpe and Francis, 1979). The Central Volcanic Zone (CVZ) of the Andes is developed by the subduction of the oceanic Nazca Plate beneath the continental South American Plate (Thorpe and Francis, 1979; de Silva and Francis, 1991). This volcanic zone is located between latitudes 14° to 29°S of the Andean Cordillera (Thorpe and Francis, 1979), which is characterized by an elevated region over 4,200 m in altitude constituting the morpho-tectonic areas known as Altiplano (14°-23°S; Bolivia, Chile, and Argentina) and Puna (23°-29°S; Chile and Argentina) (de Silva and Francis, 1991; Trumbull et al., 2006).

The ascent of magmas takes place through the weakness of an exceptionally thick continental crust from >70 km (below western Cordillera) to 55 km (south of Puna plateau), which resulted from tectonic shorting during the last 10 Ma (James, 1971; Allmendinger, 1986). Magma at CVZ generated from such mantle is underplated at the base of the crust and may experience assimilation, fractional crystallization, mixing/mingling during subsequent uprise to the through the crust (Thorpe, 1984; Mamani et al., 2010; de Silva and Kay, 2018). These magmas are formed in subduction zones by partial melting in the mantle wedge associated with fluids derived from the down-going oceanic lithosphere (Thorpe and Francis, 1979; Stern, 2004).

Volcanism within the CVZ is mainly dominated by at least 110 Quaternary volcanoes (de Silva and Francis, 1991; Siebert et al., 2011), which in some cases exhibit thermal and/or fumarolic activity and peaks reaching over 6,000 m a.s.l. (e.g. González-Ferrán, 1995; Aguilera et al., 2020; Veloso et al., 2020). This volcanic zone is characterized by larges ignimbrite provinces (Guzmán et al., 2014; Wörner et al., 2018b), numerous polygenetic or stratovolcanoes, and more rarely monogenetic centers (de Silva and Francis, 1991; González-Ferrán, 1995). Among CVZ, northern Chile is characterized by 32 active volcanoes (see Fig. 1a; Contreras Vargas et al., 2020). However, many volcanoes in northern Chile have no record of historical activity, and they are considered potentially active based on different criteria such as pristine morphology, geochronology, surface deformation, seismic activity, thermal and/or fumarolic activity (e.g. de Silva and Francis, 1991; González-Ferrán, 1995; Stern, 2004; Grosse et al., 2018; Aguilera et al., 2020).

Chiliques volcano is a Pleistocene-Holocene stratovolcano located in northern Chile (see Fig. 1b; Ramírez and Gardeweg, 1982). This center was built up during the Local Late Glacial Maximum period (12–10 ka; Klein et al., 1999) and rested upon the 0.53 Ma old Tuyajto ignimbrite (Barquero-Molina, 2003). Chiliques is a potentially active volcano that ranks 83rd out of 92 active volcanoes in Chile and 24th out of 32 active volcanoes in northern Chile (Contreras Vargas et al., 2020). This volcano hosts two lakes at its summit crater (at 5,767 m a.s.l.), one on the northern side (130 m diameter; maximal diameter in N-S direction), and the second one on the eastern side (150 m diameter; maximal diameter in E-W direction). On the other hand, Chiliques was considered one of the most important ceremonial centers in the Likan Antai culture. This volcanic center constituted an Inca shrine for the performance of rituals of the Atacama native community of Socaire, being associated with agricultural activities and ceremonial rituals (Moyano and Uribe, 2012; Moyano et al., 2018).

Although Chiliques has no records of historical eruptive activity, between January 6 and April 5, 2002, Infrared ASTER night images were taken by NASA showed an anomaly associated with a hot spot (Pieri and Abrams, 2004). Nevertheless, new images taken between May and June 2002 show no hot spots, attributed to this thermal anomaly transient (Pritchard and Simons, 2004) with temperatures up to 15 K above background (Jay et al., 2013).
The aim of this work is to present the preliminary volcanological evolution of Chiliques, focusing on the main eruptive stages of this volcano. This contribution presents geological, geochemical, and morphological data, increasing the basic knowledge of this volcano. In addition, this manuscript contributes to the knowledge of the eruptive history of one poorly known volcano from northern Chile.

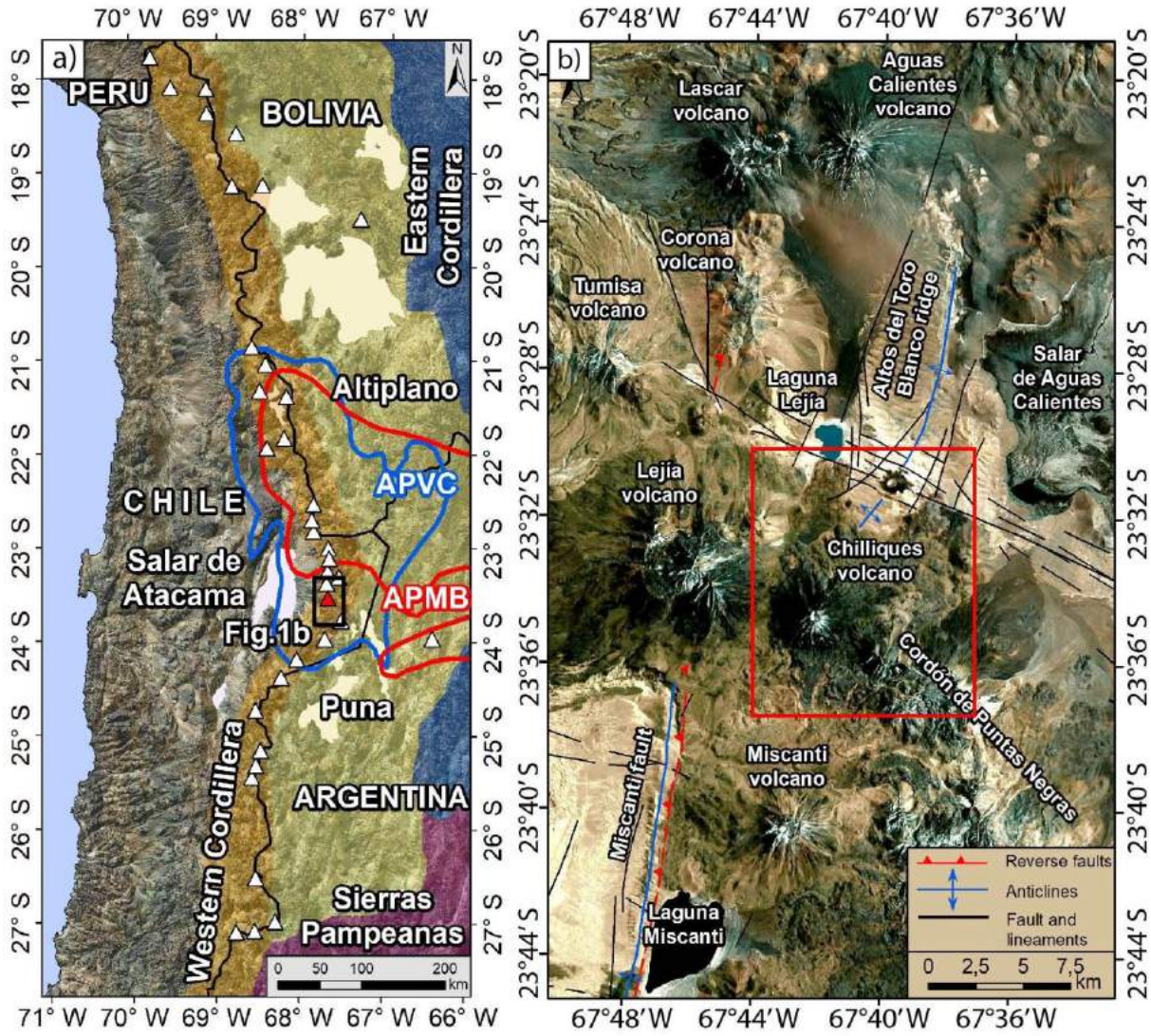


Fig. 1. a) Location of the Chiliques volcano (red triangle) within the Central Volcanic Zone of the Andes, modified from Trumbull et al. (2006); white triangles indicate active and potentially active volcanoes. APVC (Altiplano-Puna Volcanic Complex; de Silva, 1989); APMB (Altiplano-Puna Magma Body; Zandt et al., 2003). b) Location map of the Chiliques volcano based on a satellite image acquired using the SAS Planet software. The red box shows the location of Chiliques. The structural features were taken from González et al. (2009) and Ramírez and Gardeweg (1982).

GEOLOGICAL SETTING

Chiliques is a composite volcano located in the Central Andes of northern Chile. It is situated 9 km south of the Lejía lake, in the western margin of the Cordón de Puntas Negras chain (see Fig. 1b). Besides, Chiliques is situated close to the Lascar volcano (see Fig. 1b), which is the most active volcano of northern Chile (Contreras Vargas et al., 2020). On the other hand, Chiliques is situated at the southern border of a major volcano-tectonic province known as the Altiplano-Puna Volcanic Complex (APVC; de Silva, 1989; see Fig. 1a). The APVC has been associated with a large portion of magma, which may be partially molten, and known as Altiplano-Puna Magma Body (APMB; Ward et al., 2017; see Fig. 1a). This volcano-tectonic area is characterized by a thickened crust (59 km; Yuan et al., 2002) that displays two melt storage zones in the upper and lower crust, respectively, which are known as MASH (mixing, assimilation, storage, homogenization) zones (de Silva and Kay, 2018; Wörner et al., 2018a).

Structurally, Chiliques is situated at a tectonically active site characterized by the intersection of several tectonovolcanic lineaments (see Fig. 1b) such as Miscanti Fault (NNE-SSW; González et al., 2009), Miscanti Lineament (also called Callejón de Varela Fault; Ramírez and Gardeweg, 1982), Cordón de Puntas Negras chain (NW-SE; de Silva and Francis, 1991), Altos del Toro Blanco ridge (NE-SW; Ramírez and Gardeweg, 1982), and Calama-Olacapato-El Toro Fault (WNW-ESE; Matteini et al., 2002).

Chiliques volcano is formed above a basement composed of a serie of volcanic, volcanoclastic, and sedimentary sequences intruded by granitoid rocks from the Permian to Miocene (Ramírez and Gardeweg, 1982), Pliocene-Pleistocene andesitic to dacitic lava flows (Ramírez and Gardeweg, 1982; González-Ferrán, 1995), and Pleistocene Tuyajto Ignimbrite (0.53 ± 0.17 Ma, $^{40}Ar/^{39}Ar$ in biotite; Barquero-Molina, 2003).

METHODS

Fieldwork was carried out to define different volcanic units, to identify volcanic structures, and to collect samples of each defined unit. A total of 15 representative samples were collected, including lava-flow deposits and ignimbrites (see Fig. 2).

The samples collected were petrographic (5 samples of lava flows) and chemically (5 samples of lava flows and 1 sample of the Tuyajto Ignimbrite; see Fig. 2) analyzed. The petrographic study was carried out, although thin sections, using a polarized-light petrographic microscope at Universidad Católica del Norte, Chile. Crystal sizes were defined as phenocrysts (>0.50 mm), microphenocrysts (0.05–0.50 mm), and microlites (<0.05 mm), which are part of the groundmass (González, 2008).

Chemical data were obtained from fresh whole-rock samples of the Chiliques volcano. Major and trace elements were analyzed by x-ray fluorescence (XRF) using a Siemens SRS-3000 spectrometer at Universidad Católica del Norte. In contrast, trace elements and rare earth elements (REE) were analyzed by an inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the *GFZ German Research Centre for Geosciences*, Potsdam (Germany).

The morphometric parameters were analyzed using the MORVOLC algorithm (http://cediac.uncu.edu.ar/software/; Grosse et al., 2009; Grosse et al., 2012) with a

TanDEM-X 12 m pixel resolution image (Krieger et al., 2007). The outlines of Chiliques volcano were obtained manually using a slope map generated with the ArcGIS™ software.

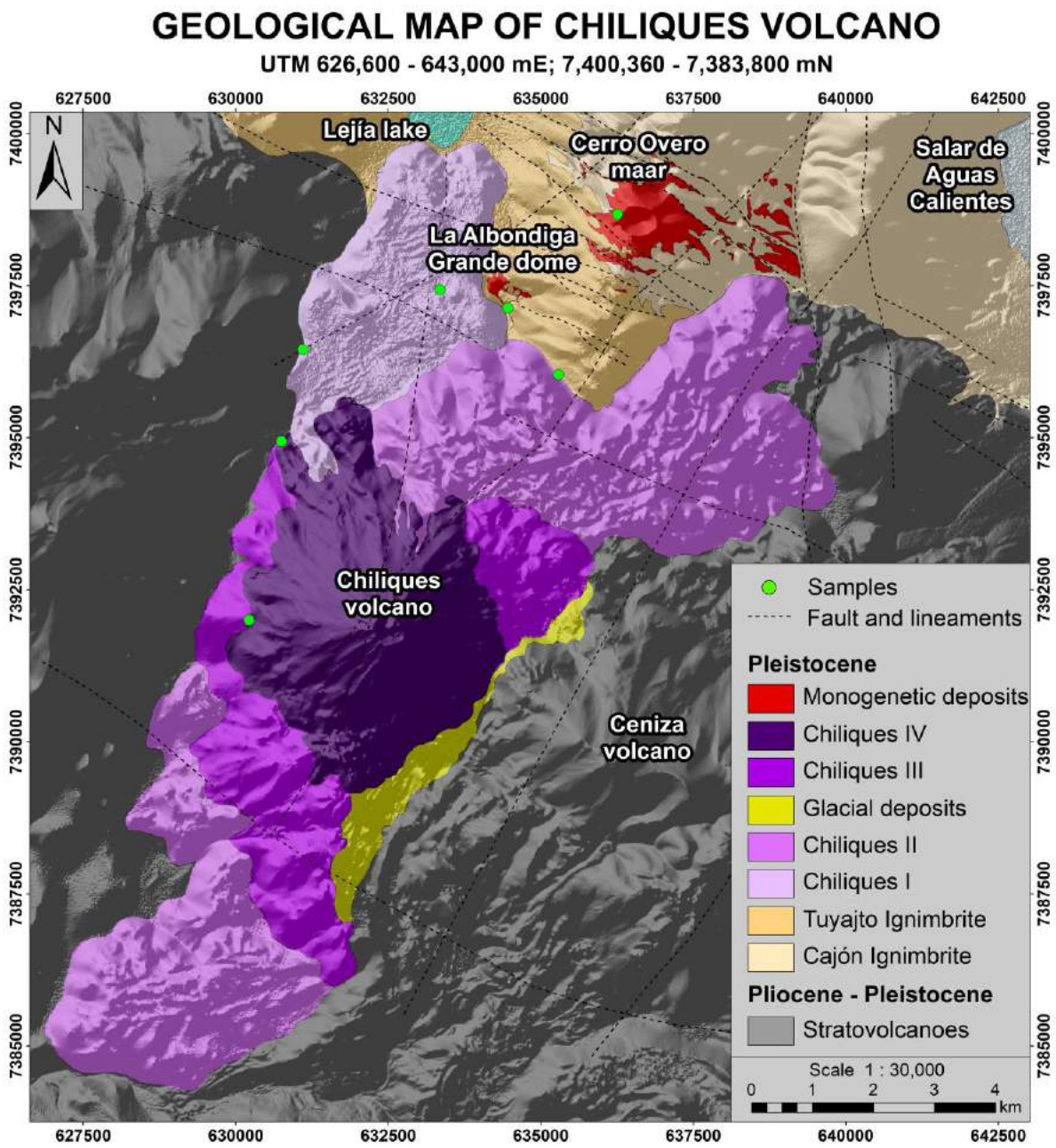


Fig. 2. Geological map of Chiliques volcano. The structural features were taken from González et al. (2009) and Ramírez and Gardeweg (1982).

RESULTS

Geology

The Chiliques volcano geology is summarized on a geological map (scale 1:30.000) in Fig. 2. Petrographically, their products correspond to blocky andesites with glomeroporphyric and

vesicular texture (see Fig 3a-3c). The mineral assemblage is dominated by polysynthetic twinning plagioclase with fine sieve texture, clinopyroxene with skeletal texture, and amphibole and biotite with corroded edges and thin opaque rims (called breakdown/reaction rims). The groundmass is vitric with microlites of plagioclase with trachytic texture, clinopyroxene, amphibole, biotite, and hematite.

Chiliques I: This unit corresponds to the first evolutionary stage of the Chiliques volcano. It is composed of heavily eroded andesitic lava flows with scarce and poorly preserved primary morphologies. It outcrops at the northwest flank of the volcanic edifice in the Lejía lake sector (see Fig. 2 and Fig. 3d) between 4,458 and 4,350 m a.s.l. It overlies the Tuyajto Ignimbrite and is covered by lava flows from Chiliques II, III, and IV. Lava flows have a maximum extension of 8.1 km from the actual vent and are up to 50 m thick. The flows exhibit a flat surface with discontinuous, eroded, and disaggregated ridges. The blocky lava flows are reddish-gray and are up to 1.5 m in diameter with irregular edges. No radiometric ages are available for the Chiliques I unit, but based on its stratigraphic position on top of the Tuyajto Ignimbrite is assigned to the Pleistocene.

Chiliques II: This unit is composed of thick lava flows outcropping at the southern, northern, and northeastern flank of the volcano. The flows overlie the Chiliques I unit, the Tuyajto Ignimbrite, and older flows from the Ceniza volcano and are covered by the Chiliques III and Chiliques IV units (see Fig. 2 and Fig. 3d). The lava flows reach up to 9 km in length from the volcano, they range from flows with wide ridges, poorly preserved levee structures, and steep sub-rounded fronts to flows with rough surfaces and disaggregated ridges.

Chiliques III: This unit is composed of lava flows that outcrop at the eastern, western, and southern flanks of the volcanic edifice (see Fig. 2 and Fig. 3d). These lava flows are located between 4,360 and 4,927 m a.s.l., lying in between the Chiliques II units and the Chiliques III unit and glacial deposits. Flows have isolated and wide arcuate ridges with a unique rounded flow front that increases in width to downslope. No radiometric data is available from Chiliques III unit, but based on its stratigraphic relationship on top of the units Chiliques I, Chiliques II, and under glacial deposits, it is assigned to the Pleistocene.

Chiliques IV: This unit corresponds to the building of the upper part of the main volcanic edifice (see Fig. 2 and Fig. 3d). It is characterized by effusive activity forming andesitic block-type lava flows. The lava flows overlie all the previous units and are covered by alluvial and glacial deposits on its southern flanks. Lava flows have a concentric flow direction from the emission center with a maximum extension of 4 km. Individual flows are up to 20 m in thickness, exhibiting straight edges with a unique lobulated front and poorly preserved arcuate ridges and discontinuous levees. In the summit area, the volcano has a low deep crater and is ~500 m diameter. The crater area shows eroded surfaces and two small lagoons. Radiometric data is not available but based on its stratigraphic position, and the presence of pristine morphologies, the Chiliques IV unit is assigned to the Pleistocene-Holocene.

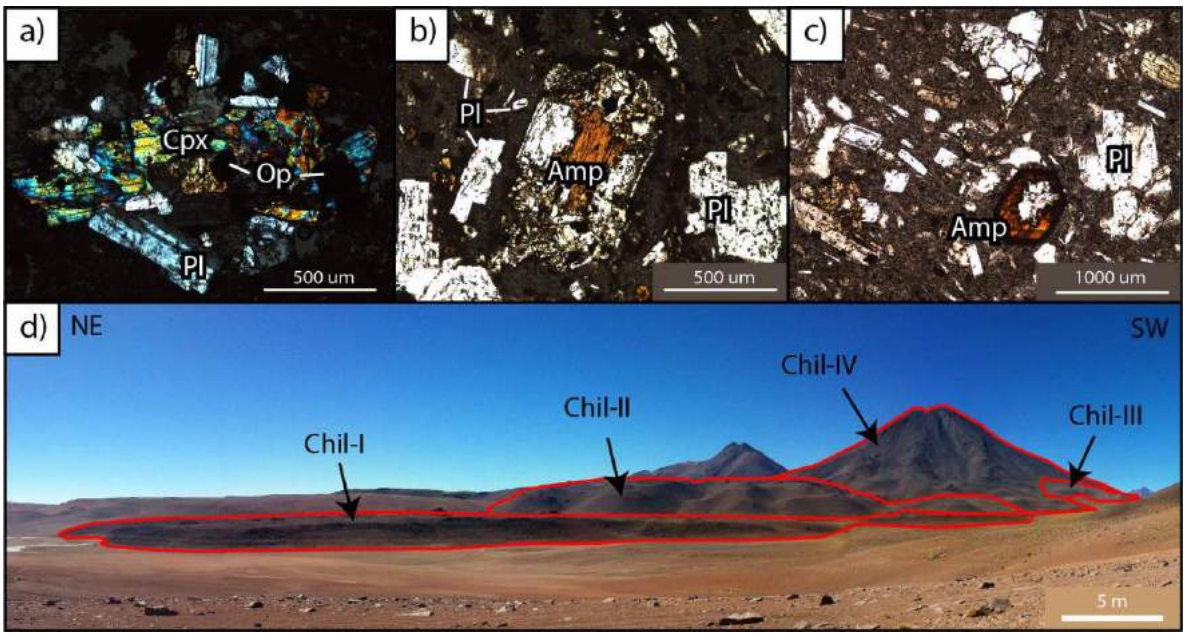


Fig. 3. a) Photomicrograph from Chiliques I unit, showing glomeroporphyric texture of clinopyroxene; plagioclases with sieve texture, zoning, and polysynthetic twinning; and opaque mineral (cross-polarized light). b) Photomicrograph from Chiliques II unit, showing two populations of plagioclase crystals with sieve texture (plane parallel light). Pl: Plagioclase; Amp: Amphibole; Cpx: Clinopyroxene; Op: Opaque. c) Photomicrograph from Chiliques IV unit, showing amphibole and biotite with breakdown/reaction rims (plane parallel light). d) Panoramic view of the Chiliques volcano lava flows.

Geochemistry

The eruptive products from Chiliques volcano correspond to andesite, and dacites (59.11 – 63.75 wt.% SiO_2; see Fig. 4a), which vary from medium to high-K calc-alkaline series (see Fig. 4b), with increasing K_2O from 1.85 to 2.80 wt.% with differentiation (see Fig. 4b). The analyzed lavas also show decreasing trends in Fe_2O_3, MgO, TiO_2, CaO, Na_2O, and Al_2O_3 with increasing SiO_2 content. The Chiliques lavas display a high concentration of Sr (449 – 712 ppm) and Rb (63 - 144 ppm), and low concentrations of Y (16 – 25 ppm) and Yb (1.34 – 2.14 ppm). REEs are significantly fractionated, e.g. the ratio of Sr/Y =17.96 – 38.07, La/Yb = 10.17 – 21.09 both for low Y and Yb contents. Samples normalized to chondrite (Sun and McDonough, 1989) show that the large ion lithophile elements (LILE) are more enriched than high field strength elements (HFSE) (see Fig. 4c). Samples normalized to the N-MORB (Sun and McDonough, 1989) show negative anomalies of Nb, Pr, and P, whereas K, Pb, Sr, and Nd show positive anomalies (see Fig. 4d).

Morphometry

Chiliques volcano has a conical shape, with a circular base and steep, smooth concave profile being classified as a cone. This volcano covers an area of 75.16 km^2, displaying an edifice height of 1,473 m, an edifice maximum bulk volume of 25.9 km^3, and a Height to Basal width ratio of 0.13. It has a small, relatively flat summit area of 0.06 km^2, whereas the mean slope of the whole edifice is 25°.

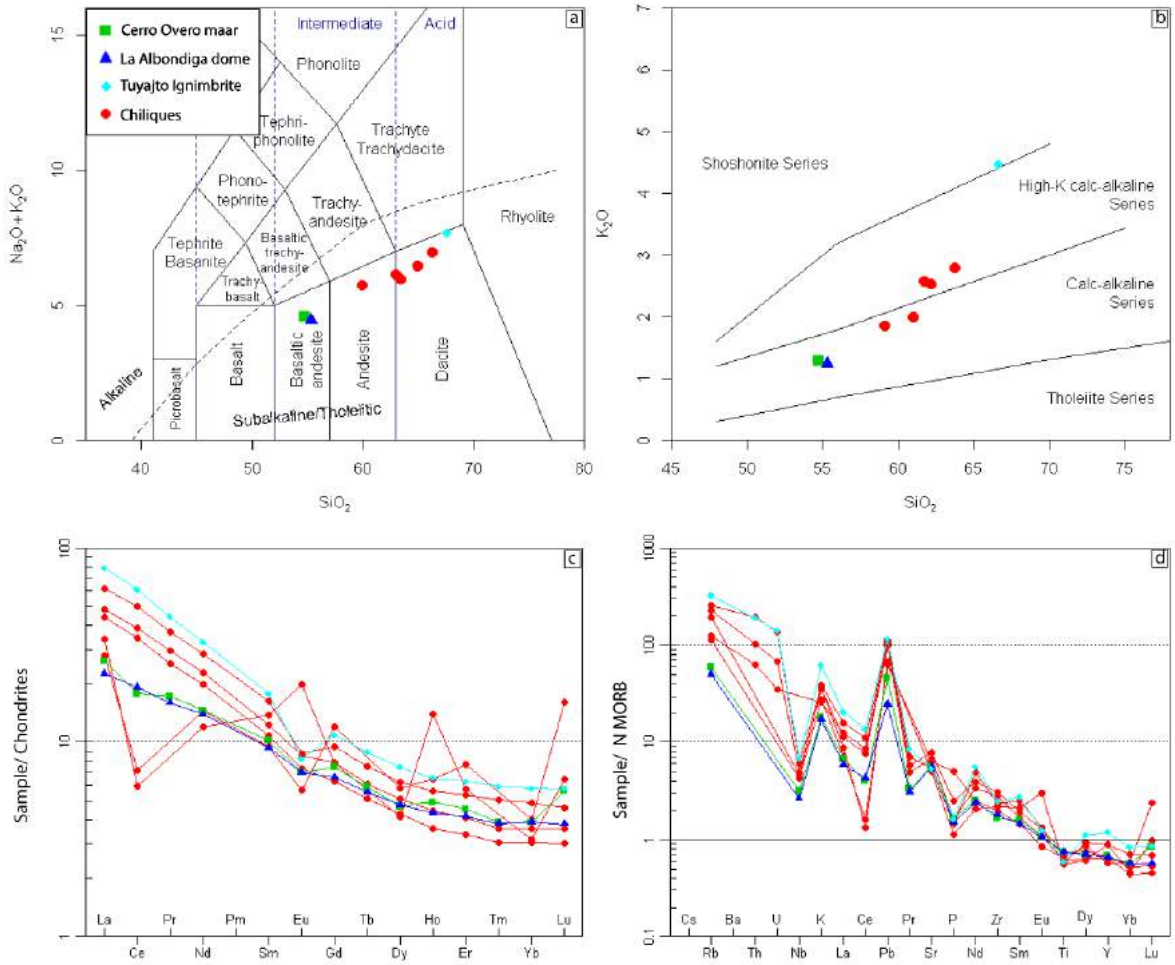


Fig. 4. Geochemical diagrams for Chiliques whole-rock samples. a) TAS diagram (Le Maitre et al., 1989). b) Alkali silica diagram (Peccerillo and Taylor, 1976). c)-d) Multi-element diagrams, Chondrite and N-MORB, respectively (normalized values from Sun and McDonough, 1989).

DISCUSSION

Magmatic processes

Based on the thin sections analysis, the minerals assemblage consists of phenocrysts of plagioclase, clinopyroxene, hornblende, biotite, and Fe-Ti oxides (in abundances order) with porphyritic, glomeroporphyric, and hyalopilitic textures. Samples show at least two populations of plagioclase crystals (see Fig. 3b-c). One population is formed by sub-euhedral and euhedral phenocrysts, with zoning and well-defined outer crystal faces. The other population consists of phenocrysts with a core that exhibits sieve texture, zoning, and polysynthetic twinning. Clinopyroxenes are relatively euhedral and show ophitic texture. Amphibole and biotite phenocrysts have coarse-grained breakdown/reaction rims associated with forming during a fast ascent of magma (Rutherford, 2008; De Angelis et al., 2015) and show subhedral habits. Processes of fractional crystallization and assimilation can be interpreted by the participation of plagioclase crystallization, amphibole, and biotite fractionation. On the other hand, a fast ascent of the magma can be interpreted by disequilibrium textures as amphiboles with breakdown/reaction rims and sieve textures of plagioclases (e.g. Rutherford and Hill, 1993; Sosa-Ceballos et al., 2015). The variation of

Dy/Yb ratios versus SiO_2 shows garnet and amphibole presence against plagioclase (see Fig. 5). Amphibole fractionation will decrease this ratio (Davidson et al., 2007) and is visible in two samples with a smaller Dy/Yb ratio (see Fig. 5). They have the biggest phenocrysts of amphibole (> 0.5 mm), while other samples have mainly amphibole in the groundmass.

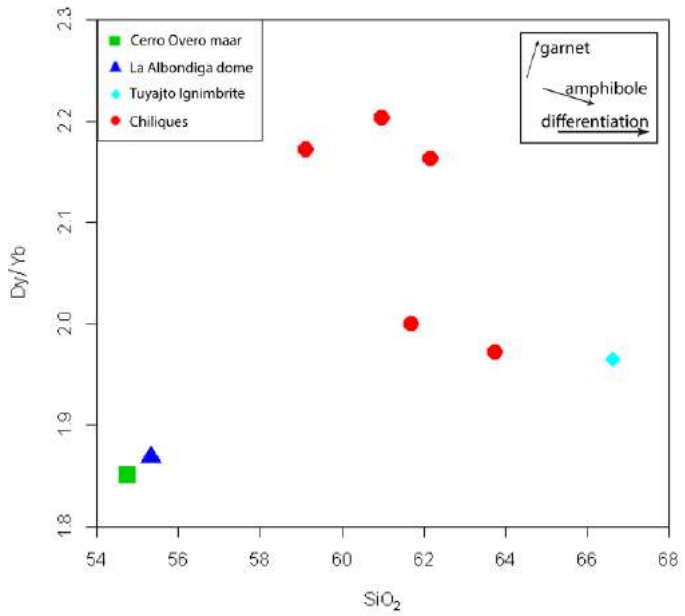


Fig. 5. Geochemical diagram of Dy/Yb vs. SiO_2, showing a differentiation trend and amphibole fractionation of the Chiliques samples.

Volcanic evolution

Chiliques is a polygenetic volcano resulting from four main stages of evolution. Although there are no chronological data available, these stages have been classified by relative ages based on morphological approaches, volcanic texture, degradation degree, and stratigraphic relations between their deposits and the dated regional ignimbrite plateau (e.g. Tibaldi et al., 2017; Haag et al., 2019; Morfulis et al., 2020).

Stage 1: The first stage corresponds to the formation of the andesitic lava flow block with levées structure. This lava flow is 50 m thick and extends over a length of 8 km to N-NW from Chiliques crater towards Lejía lake.

Stage 2: This stage corresponds to the andesite basaltic lava flow block with levées structures and a maximum extension to NE of 6.5 km. Geochemically, this stage would be associated with forming two monogenetic volcanoes called Cerro Overo maar and La Albondiga Grande dome (Ureta, 2015). Cerro Overo maar (77 ± 7.8 ka, U-Th/He in zircon; van Alderwerelt, 2017) is located 8.6 km NE Chiliques's crater with a diameter of 580 x 480 m (in east-west direction) and 72 m depth, while La Albondiga Grande dome is located 7 km NE Chiliques crater, with 55 m height and covering 5.19 x 10^4 m^2 (Ureta et al., under review BV).

Stage 3: The third stage corresponds to the formation of the lobed andesitic-dacitic lava flows with ogive and levées structures distributed towards to southwest and northeast flanks of the Chiliques volcano. In this last flank, the flow constitutes a more significant extension to 9.4 km with a height of 60 m.

Stage 4: This last stage corresponds to several andesitic-dacitic lava flows that constitute the current volcanic edifice, which reaches a height of 1,473 m.

CONCLUSION

The morphometric, petrographic, and geochemical characteristics suggest the Chiliques volcano formation corresponds to polygenetic activity, which has one dominant vent showing a pristine volcanic edifice. The magmatic source of Chiliques products is related to a magma sourced from partial melting of the mafic continental lower crust (depths > 70 km), suggesting that the magma has fractionated garnet ± amphibole in its origin. The resulting deposits indicate a fast ascent of the erupted magma from its magmatic chamber to the surface, evidencing processes of assimilation and interaction of different magmas as stages of new inputs of magmas.

REFERENCES

Aguilera, F., Layana, S., Rojas, F., Arratia, P., Wilkes, T.C., González, C., Inostroza, M., McGonigle, A.J.S., Pering, T.D. and Ureta, G. First Measurements of Gas Flux with a Low-Cost Smartphone Sensor-Based UV Camera on the Volcanoes of Northern Chile. Remote Sensing, 12(13): 2122 (2020).

Allmendinger, R.W. Tectonic development, southeastern border of the Puna Plateau, northwestern Argentine Andes. Geological Society of America Bulletin, 97(9) (1986).

Barquero-Molina, M. 40Ar/39Ar chronology and paleomagnetism of ignimbrites and lavas from the central volcanic zone, northern Chile, and 40Ar/39Ar chronology of silicic ignimbrites from Honduras and Nicaragua. Master Thesis Thesis, Madison, University of Wisconsin, 70 pp (2003).

Contreras Vargas, M.A., Figueroa Vera, M. and Pedrero Delgado, G. Ranking de Riesgo Específico de Volcanes Activos de Chile 2019, Servicio Nacional de Geología y Minería, Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica (2020).

Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. and Dosseto, A. Amphibole "sponge" in arc crust? Geology, 35(9): 787-790 (2007).

De Angelis, S.H., Larsen, J., Coombs, M., Dunn, A. and Hayden, L. Amphibole reaction rims as a record of pre-eruptive magmatic heating: An experimental approach. Earth and Planetary Science Letters, 426: 235-245 (2015).

de Silva, S.L. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. Geology, 17(12): 1102-1106 (1989).

de Silva, S.L. and Francis, P.W. Volcanoes of the central Andes. Springer-Verlag, Berlin (1991).

de Silva, S.L. and Kay, S.M. Turning up the Heat: High-Flux Magmatism in the Central Andes. Elements, 14(4): 245-250 (2018).

González-Ferrán, O. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago (1995).

González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E.E. and Shyu, J.B.H. Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23°S–24°S). Tectonics, 28(6): TC6003 (2009).

González, P.D. Texturas de los cuerpos ígneos, Geología de los Cuerpos Ígneos. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y complementaria Nº 29 (ISSN 0328-2759) e INSUGEO, Serie Correlación Geológica Nº 15, Buenos Aires, pp. 171-197 2008.

Grosse, P., Orihashi, Y., Guzmán, S.R., Sumino, H. and Nagao, K. Eruptive history of Incahuasi, Falso Azufre and El Cóndor Quaternary composite volcanoes, southern Central Andes. Bulletin of Volcanology, 80(5): 44 (2018).

Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P.A., Kervyn, M. and Petrinovic, I.A. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. Geomorphology, 136(1): 114-131 (2012).
Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A. and Alvarado, G.E. Morphometry and evolution of arc volcanoes. Geology, 37(7): 651-654 (2009).
Guzmán, S., Grosse, P., Montero-López, C., Hongn, F., Pilger, R., Petrinovic, I., Seggiaro, R. and Aramayo, A. Spatial–temporal distribution of explosive volcanism in the 25–28°S segment of the Andean Central Volcanic Zone. Tectonophysics, 636: 170-189 (2014).
Haag, M.B., Baez, W.A., Sommer, C.A., Arnosio, J.M. and Filipovich, R.E. Geomorphology and spatial distribution of monogenetic volcanoes in the southern Puna Plateau (NW Argentina). Geomorphology, 342: 196-209 (2019).
James, D.E. Andean crustal and upper mantle structure. Journal of Geophysical Research, 76(14): 3246-3271 (1971).
Jay, J.A., Welch, M., Pritchard, M.E., Mares, P.J., Mnich, M.E., Melkonian, A.K., Aguilera, F., Naranjo, J.A., Sunagua, M. and Clavero, J. Volcanic hotspots of the central and southern Andes as seen from space by ASTER and MODVOLC between the years 2000 and 2010. Geological Society, London, Special Publications, 380(1): 161-185 (2013).
Klein, A.G., Seltzer, G.O. and Isacks, B.L. Modern and last local glacial maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and Northern Chile. Quaternary Science Reviews, 18(1): 63-84 (1999).
Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M. and Zink, M. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(11): 3317-3341 (2007).
Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Strekeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B. A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. International Union of Geological Sciences, 193 pp (1989).
Mamani, M., Worner, G. and Sempere, T. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 S to 18 S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Geological Society of America Bulletin, 122(1-2): 162-182 (2010).
Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R. and Maas, R. Geodynamical evolution of Central Andes at 24°S as inferred by magma composition along the Calama–Olacapato–El Toro transversal volcanic belt. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118(1): 205-228 (2002).
Morfulis, M., Báez, W., Retamoso, S., Bardelli, L., Filipovich, R. and Sommer, C.A. Quantitative spatial distribution analysis of mafic monogenic volcanism in the southern Puna, Argentina: Implications for magma production rates and structural control during its ascent. Journal of South American Earth Sciences: 102852 (2020).
Moyano, R., Bustamante, P. and Valenzuela, A. ¿Por qué la mano izquierda? Fenómenos de pareidolia en Socaire, Norte de Chile. Surandino Monográfico(4): 1-22 (2018).
Moyano, R. and Uribe, C. El volcán Chiliques y el "morar-en-el-mundo" de una comunidad atacameña del norte de Chile. Estudios atacameños: 187-208 (2012).
Peccerillo, A. and Taylor, S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63-81 (1976).
Pieri, D. and Abrams, M. ASTER watches the world's volcanoes: a new paradigm for volcanological observations from orbit. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135(1): 13-28 (2004).
Pritchard, M.E. and Simons, M. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 5(2) (2004).
Ramírez, C.F. and Gardeweg, M.P. Hoja Toconao, Región de Antofagasta. Instituto Geografico militar, Santiago, 122 pp (1982).

Rutherford, M.J. Magma Ascent Rates. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 69(1): 241-271 (2008).
Rutherford, M.J. and Hill, P.M. Magma ascent rates from amphibole breakdown: An experimental study applied to the 1980-1986 Mount St. Helens eruptions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B11): 19667-19685 (1993).
Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly, P. Volcanoes of the World. University of California Press, Berkeley (2011).
Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G. and Arce, J.L. El Ventorrillo, a paleostructure of Popocatépetl volcano: insights from geochronology and geochemistry. Bulletin of Volcanology, 77(10): 91 (2015).
Stern, C.R. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. Revista geológica de Chile, 31: 161-206 (2004).
Sun, S.-s. and McDonough, W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345 (1989).
Thorpe, R.S. The Tectonic Setting of Active Andean Volcanism. In: R.S. Harmon and B.A. Barreiro (Editors), Andean Magmatism: Chemical and Isotopic Constraints. Birkhäuser Boston, Boston, MA, pp. 4-8 1984.
Thorpe, R.S. and Francis, P.W. Variations in andean andesite compositions and their petrogenetic significance. Tectonophysics, 57(1): 53-70 (1979).
Tibaldi, A., Bonali, F.L. and Corazzato, C. Structural control on volcanoes and magma paths from local- to orogen-scale: The central Andes case. Tectonophysics, 699: 16-41 (2017).
Trumbull, R.B., Riller, U., Oncken, O., Scheuber, E., Munier, K. and Hongn, F. The Time-Space Distribution of Cenozoic Volcanism in the South-Central Andes: a New Data Compilation and Some Tectonic Implications. In: O. Oncken, G. Chong, G. Franz, P. Giese, H.-J. Götze, V.A. Ramos, M.R. Strecker and P. Wigger (Editors), The Andes: Active Subduction Orogeny. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 29-43 2006.
Ureta, G. Evolución Geológica y Petrológica del Volcán Cerro Overo Undergradute Thesis Thesis, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 132 pp (2015).
Ureta, G.N., Károly, Aguilera, F., Zimmer, M. and Menzies, A. A window of mantle-derived magmas within the Central Andes: a case study of shifting from magmatic to phreatomagmatic fragmentation at the Cerro Overo maar, northern Chile. Bulletin of Volcanology (under review BV).
van Alderwerelt, B.M.E.d.R. Diverse monogenetic volcanism across the main arc of the central Andes, northern Chile. PhD Thesis Thesis, University of Iowa, Iowa, 427 pp (2017).
Veloso, E.E., Tardani, D., Elizalde, D., Godoy, B.E., Sánchez-Alfaro, P.A., Aron, F., Reich, M. and Morata, D. A review of the geodynamic constraints on the development and evolution of geothermal systems in the Central Andean Volcanic Zone (18–28°Lat.S). International Geology Review, 62(10): 1294-1318 (2020).
Ward, K.M., Delph, J.R., Zandt, G., Beck, S.L. and Ducea, M.N. Magmatic evolution of a Cordilleran flare-up and its role in the creation of silicic crust. Scientific Reports, 7(1): 9047 (2017).
Wörner, G., Mamani, M. and Blum-Oeste, M. Magmatism in the Central Andes. Elements, 14(4): 237-244 (2018a).
Wörner, G., Schildgen, T.F. and Reich, M. The Central Andes: Elements of an Extreme Land. Elements, 14(4): 225-230 (2018b).
Yuan, X., Sobolev, S.V. and Kind, R. Moho topography in the central Andes and its geodynamic implications. Earth and Planetary Science Letters, 199(3): 389-402 (2002).
Zandt, G., Leidig, M., Chmielowski, J., Baumont, D. and Yuan, X. Seismic Detection and Characterization of the Altiplano-Puna Magma Body, Central Andes. pure and applied geophysics, 160(3): 789-807 (2003).

APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN BARRIOS VULNERABLES

Vazquez J. J.[abc] y Brown Bustos N. D.[abc]

[a]*Instituto de Ciencia y Tecnologia, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*
[b]*Centro de Estudio de Energias Renovables, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA*
[c]*Capitulo Argentino del Club de Roma, ARGENTINA*

e-mail: icytec@untref.edu.ar

RESUMEN

En total, más de 3.000.000 de personas viven hoy en barrios informales en Argentina, lo que representa más de 7% de la población del país. Lejos de revertirse, esta situación de vulnerabilidad e informalidad continúa en proceso de expansión debido al contexto general. Casi la mitad de estos asentamientos se encuentran ubicados en el conurbano bonaerense y, junto a la Ciudad de Buenos Aires, ambos distritos albergan los asentamientos más grandes y poblados. En esta situación de vulnerabilidad social, uno de los vectores de desigualdad es el energético. Este déficit se observa en numerables aspectos, como por ejemplo: problemas constructivos y cualitativos en los edificios, problemas de acceso a la energía debido a la infraestructura, y problemas de acceso a la energía por falta de recursos económicos.
En el presente trabajo se propone a la energía renovable como una manera de mejorar el acceso a la energía de las viviendas, comedores, merenderos y otras organizaciones de barrios vulnerables. En particular, se consideran la producción de biogás, la solar térmica para calentamiento de agua, y la energía la solar fotovoltaica para inyección de energía a la red y para bombeo. Se analizará, para ello, dos proyectos de características diferentes pero con fines similares: la construcción de viviendas nuevas en el Barrio 31, con elevados estándares de eficiencia energética y tres sistemas independientes de energía renovable, y el desarrollo y construcción de "biosistemas urbanos" en comedores populares de las villas 15 y 20, en los que se incorporaron varias tecnologías de sustentabilidad de manera articulada. Se mostrará, en particular, las características de cada tecnología implementada, su eficiencia, simplicidad de instalación, robustez y, por último, la aceptación y uso efectivo por los vecinos.
Los resultados del trabajo en campo concluyen que, en entornos vulnerables, las aplicaciones de energía renovable pueden ser viables y exitosas sólo si se prioriza la sencillez en el uso y la eficiencia y el rendimiento de los equipos instalados.

Palabras Clave: Energías renovables, construcción sustentable, biosistemas

INTRODUCCIÓN

La serie de crisis y depresiones económicas que vienen sucediendo desde mediados de la década del '80, y falta de planificación del crecimiento en el Conurbano, sumado al incremento de necesidad habitacional, muestra un panorama gris para los sectores más vulnerables de nuestra sociedad. Según un relevamiento de RENABAP (Registro Nacional de Barrios Populares) de 2018, existen 4100 barrios informales en el país, de los cuales 1020 están en el conurbano Bonaerense, donde residen hoy casi 2.000.000 de

argentinos. No se sabe a qué número ascenderá este valor a finales de 2020, pero los indicadores de pobreza e indigencia no son alentadores.

Esta situación social, vinculada con la informalidad y la pobreza, tiene un correlato directo en la sustentabilidad y el ambiente, que castigan de manera desproporcionada a los barrios más carenciados en las dimensiones energética, sanitaria y alimentaria.

La sociedad a nivel mundial, y en Argentina en particular, se encuentra atravesando una profunda crisis vinculada a lo energético. La declinación de los yacimientos petroleros convencionales, cuyos recursos finitos se agotan, se suma al desafío del Cambio Climático que impulsa a un cambio global de paradigma, principalmente en lo que se refiere a la energía. La necesidad de mitigar las emisiones de gases contaminantes afecta a todo el mundo, y los crecientes costos de la energía afectan a la población más vulnerable; el crecimiento de la población y la demanda en las ciudades, combinada con una sub-inversión en redes eléctricas en las últimas décadas, hacen que el aprovisionamiento energético en la Ciudad de Buenos Aires sea inestable y poco confiable.

Consecuentemente, allí donde las redes no están tendidas formalmente, o no se utilizaron normas técnicas para su desarrollo, los cortes de suministro son muchos más frecuentes, careciendo de procedimientos de reclamos reconocidos, dependiendo de la auto-gestión barrial. Sin red eléctrica estable, y sin redes de gas natural, la cocción se hace muchas veces con gas de garrafa; lo que conlleva a un mayor costo. En lo que respecta al aprovisionamiento de energía, “el que menos tiene es el que más la paga”.

Por su parte, los residuos contribuyen a la problemática mundial, que se refleja en rellenos sanitarios llenos, contaminación de suelos, islas de plásticos en el océano. Las causas de estos desafíos se encuentran en el actual modelo de desarrollo, basado en el consumo exacerbado, un pensamiento lineal de los procesos productivos y una cosificación de la naturaleza; en una economía lineal que extrae, transforma, distribuye, consume y desecha recursos finitos que, en general, no pueden ser reinsertados en los ciclos naturales. Así, en todos los ambientes merma la gestión y conservación de los bienes y servicios naturales. Pero es en los sectores rurales y urbanos más vulnerables, donde no se realiza la recolección de residuos, que el problema de los residuos deja de ser un problema global y se vuelve local, palpable; malos olores, insectos, roedores y estos se vuelven vectores de enfermedades y fuente de contagio.

El acceso a una alimentación sana es un problema constante de la actualidad. El mismo modelo de producción industrial que llena de residuos el ambiente se replica en la producción de alimentos; este modelo nos aleja de nuestras fuentes naturales de alimentación, y en una sociedad en procesos creciente de urbanización, se relega en actores lejanos (“el campo”) la producción de alimentos. Al disociarse la producción de nuestros alimentos y la naturaleza que los hace posible, los alimentos pasan a producirse a costa de un desplazamiento de la frontera agrícola, con la subsecuente degradación de ecosistemas, pérdida de biodiversidad, y ruptura del equilibrio climático. De modo que, detrás de este cambio en los usos de suelo e impacto ecosistémico, resultan en inundaciones, sequías, incendios forestales en todo el mundo.

Pero es en los barrios informales donde el problema de la producción de alimentos se vuelve escasez; donde la lejanía de los centros de producción se vuelve dificultad en el acceso; donde la otredad de la propiedad de los métodos productivos de comida se vuelve hambre.

En definitiva, residuos, alimentos y energía son las dimensiones ambientales que hacen de contracara del problema social de los barrios informales. Resulta, entonces urgente e

impostergable diseñar, desarrollar y replicar proyectos que promuevan la autonomía energética, alimentaria y de gestión de residuos, y fortalezcan la capacidad de adaptación e incremento de la resiliencia ante los efectos -presentes y futuros- de los problemas ambientales en los barrios informales.
El presente trabajo se encuentra orientado a mostrar soluciones factibles y económicas, con un impacto social positivo a través de intervenciones en el consumo y generación de energía, la producción y cocción de alimentos, y la gestión sustentable de los residuos.
En este sentido, se toman como antecedentes proyectos de la Fundación Club de Roma y de la Ciudad de Buenos Aires, financiados por el Banco Interamericano de Desarrollo y el Banco Mundial, en diferentes intervenciones en barrios y organizaciones socio-comunitarias (OSC). En estos proyectos desarrollaron intervenciones de impacto sistémico para disminuir la desigualdad mediante la incorporación innovadora de capital tecnológico, social y cultural. Así, mediante la aplicación de conceptos de economía circular y desarrollo ecosistémico, y desde un abordaje holístico y participativo, propició la construcción de ciudades y comunidades sustentables y resilientes.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL: RELEVAMIENTO DE LAS EXPERIENCIAS

El presente trabajo puede dividirse en la formación de biosistemas para comedores comunitarios y la construcción de viviendas sustentables en barrios vulnerables.
Biosistemas Integrados en Comedores Comunitarios:
El biosistema integrado que se analizó fue el instalado en el comedor comunitario En-Haccore, surgido en 1993 en la manzana 15 de Ciudad Oculta, uno de los barrios más castigados del sur de la Ciudad de Buenos Aires.
Para la construcción de un biosistemas mediante aplicación de tecnologías sustentables en este comedor se buscó primero satisfacer las necesidades básicas para su funcionamiento, emulando el funcionamiento cíclico propio de la naturaleza, en donde los desechos de un proceso se convierten en insumos de otros. Para determinar las principales necesidades del comedor se realizaron encuentros con las autoridades y los trabajadores, en donde se determinó las demandas energéticas del comedor, el volumen de personas que atendía, los servicios que presta a la comunidad, etc.
Uno de los principales problemas que se evidenciaron fue el consumo de gas, el cual se utilizaba para cocinar los desayunos, almuerzos y meriendas. El gas de garrafa, que se utiliza en la mayoría de los barrios informales, tiene mayor costo que el gas de red y por lo tanto es menos eficiente para una alta demanda como en el caso de un comedor social. Por lo tanto, dado que el consumo de garrafas afectaba directamente la economía del comedor, se decidió buscar alternativas que permitieran un ahorro directo en el presupuesto diario de la institución.
Para abordar dicho problema se realizó un relevamiento del consumo de gas, determinándose que el mayor consumo del mismo se utiliza para el calentamiento de agua, dado que la mayoría de los alimentos que se preparan son de olla (guisos, sopas, legumbres, fideos, arroces, te, café, mate, etc) y por lo tanto requieren gran cantidad de agua caliente.
Primero se propuso disminuir el consumo energético mediante el aumento de la temperatura del agua en la cocina, pre-calentándola, y -como segundo paso- aumentar la eficiencia de la cocción con ladrillos refractarios. Para esto se instaló en el techo del comedor un termotanque solar de tubos de vacío, con una capacidad de 200 litros, un tamaño consistente con el consumo diario del comedor, de manera que el agua ya llega

caliente para la cocción. Para aumentar la eficiencia del proceso de calentamiento de agua, se buscó disminuir las pérdidas de calor, mediante la aplicación de ladrillos refractarios a los costados de las ollas; estos ladrillos mantienen el aire caliente de la combustión del gas más cerca de las ollas y durante más tiempo, aumentando la eficiencia en la cocción: el agua hierve más rápido.
Luego se buscó profundizar la aplicación de conceptos de Economía Circular. Para ello se planteó abordar el tratamiento de los residuos desde una perspectiva innovadora, integral y ecosistémica, manteniendo el eje central en el rol principal del establecimiento (preparación de comidas). Se propuso como eje central, entonces, la instalación de un biodigestor junto con una compostera en el patio saliendo de la cocina, una huerta de tierra construida con cajones de madera en la terraza, una huerta hidropónica también en la terraza y una huerta de hongos en la cocina de panadería.
De esta forma, el biodigestor, alimentado por los residuos orgánicos provenientes de la preparación de alimentos, genera biogás, el cual se puede utilizar para la cocción, y un líquido fertilizante que se circula- con una pequeña bomba alimentada por energía solar- en la huerta hidropónica. La compostera utiliza los residuos de la preparación de alimentos que no alimentan al biodigestor, generando fertilizante para las huertas en tierra de la terraza, mientras que la huerta de hongos es alimentada por los residuos celulósicos (cáscaras, verduras, pasto seco, hojas, etc.).
Se transformaron así las prácticas en torno a los residuos en un espacio comunitario barrial, emulando el funcionamiento cíclico propio de la naturaleza, en donde los desechos de un proceso se convierten en insumos de otros.

Viviendas sustentables:

Dentro del Plan Integral de Urbanización de este barrio 31 se construyeron 1200 viviendas nuevas, y se buscó, para la construcción de las mismas incorporar en el diseño un elevado estándar de sustentabilidad. Junto al equipo de arquitectos de la Secretaria de Integración Social y Urbana de GCBA se trabajó el desarrollo de este proyecto, especialmente para la planificación, diseño y construcción de estas nuevas viviendas.
Uno de los aspectos más característicos, novedosos e interesantes de las mismas es la aplicación de energías renovables como sistemas complementarios de energía.
Los edificios de nuevas viviendas cuentan con sistemas fotovoltaicos que funcionan de manera on-grid, es decir, conectados a la red eléctrica, con un medidor bidireccional perteneciente al consorcio, buscando asegurar dinero para el mantenimiento de los edificios.
Una de las aplicaciones más disruptivas de energía renovable en estas nuevas viviendas es la combinación de bombeo solar con energía solar térmica. Estos sistemas de bombeo solar consisten en una bomba solar, conectada a dos módulos de 330 Wp (los mismos que se utilizan en el sistema fotovoltaico conectado a la red). Estos sistemas están dimensionados para garantizar el llenado del tanque dos veces al día, en condiciones de menor generación fotovoltaica, con el sol del día más frío del invierno y nubosidad media.
Otras de las tecnologías aplicadas a las nuevas viviendas del Barrio 31, lo cual les permiten poseer elevados estándares de eficiencia energética es la aplicación de materiales y métodos de construcción especiales de aislación térmica.
Estos edificios están construidos predominantemente con materiales livianos, de construcción en seco; se utilizó tecnología de Steel Frame para muros y envolventes. Esta tecnología permite la construcción mediante una estructura portante de acero, y

muros que no transportan cargas de OSB (tableros conglomerados de virutas orientadas), placas cementicias, poliestireno expandido, lana de vidrio, placa de yeso, etc. Por sus materiales, se tratan de muros con una alta eficiencia térmica: tienen un valor de transmitancia térmica U de 0.35 W/m2K (la sexta parte de la transmitancia térmica de un muro de ladrillo hueco de 12 convencional - U = 2,10 W/m2K). Estos materiales son seis veces más eficientes, o que dejan pasar sólo la sexta parte de la energía que un muro convencional. Además de su desempeño energético, estos materiales garantizan una baja huella de carbono embebida en la construcción, por ser materiales livianos.

Sin embargo, tras la finalización del primer edificio, se observó que estos materiales no contaban con el apoyo social correspondiente a sus prestaciones técnicas. Un aspecto clave -y tácito por parte de los vecinos- fue en relación con la seguridad ya que sin el muro de ladrillo, y su solidez asociada, como separación del vecino, se generaba una sensación de inseguridad y temor a que mediante un boquete se pudieran acceder a la vivienda desde el departamento contiguo o desde los espacios comunes. Otro aspecto a tener en cuenta a nivel social era la cultura de constructores en el Barrio, con un gran conocimiento de construcción fundamentalmente de ladrillos y cemento.

La problemática en cuestión, entonces, era cómo complementar la cultura de construcción, la búsqueda de muros de ladrillo y "material", con la eficiencia energética y la sustentabilidad buscados para este proyecto. Por lo tanto se optó, a partir del segundo edificio, por un método constructivo mixto: las paredes exteriores y el techo (es decir la envolvente del edificio) serían de materiales livianos, prefabricados, con alta aislación térmica. Las paredes interiores, en cambio, serían de ladrillos de hormigón.

De manera similar, se procedió en las protecciones de las ventanas. Los vecinos acostumbran, por seguridad, enrejar sus ventanas. Para minimizar el aporte solar, en el frente norte de las viviendas se optó, entonces, por un sistema de postigos de chapa perforada al 50%, que, vistos de cerca, bloquean la mitad de la luz entrante, pero vistos a la distancia no impiden la vista. Estos postigos dan una mayor protección solar, garantizando veranos más frescos; en invierno los mismos pueden abrirse para dejar pasar más rayos del sol y obtener una mayor ganancia solar. Se optó por ventanas de doble vidriado hermético con doble vidrio laminado. Estas ventanas aumentan el nivel de seguridad de la vivienda, al mismo tiempo que su aislación térmica; permiten complementar la necesidad de seguridad, confort y sustentabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biosistemas

En las primeras mediciones la temperatura del agua desde la canilla rondaba los 10 ºC a 12 ºC, requiriendo incrementar la misma a 80º-90º durante 30 o 40 minutos para la preparación los alimentos diarios. Con el uso del termotanque solar se logró que la temperatura del agua a la salida de la canilla superara los 50 °C y al ser utilizada para la preparación de alimentos significó un ahorro directo en el consumo de gas en garrafa semanal. La utilización del agua caliente desde el colector solar requería mucho menos gas para alcanzar la temperatura de cocción, se determinó una reducción del 60% en el consumo de gas para calentamiento de agua. Esto significó un ahorro significativo en el presupuesto del Comedor, el cual pudo destinar el dinero a más alimentos.

La implementación realizada para el aislamiento térmico de las hornallas mediante la aplicación de ladrillo refractario permitió reducir las pérdidas de calor de la combustión y aumentar el rendimiento térmico, disminuyendo aún más el volumen de gas

consumido. De esta manera ambas intervenciones se logró disminuir un poco más de 70% del consumo de gas en garrafa del comedor. Generando un ahorro mensual significativo, ahorro clave que permite, a una organización como esta, mejorar la calidad nutritiva de los alimentos.
La implementación del biosistema redujo considerablemente la cantidad de residuos generados y la generación de biogás y alimentos dentro de la misma institución permitiendo la reducción de costos en la compra de gas y alimentos. También permitió la transformación de las prácticas en torno a los residuos en un espacio comunitario barrial, enfatizando la importancia de un enfoque socio-ambiental, la incorporación de esta tecnología al comedor también se la acompañó de actividades de sensibilización comunitaria y capacitaciones para:

- Promoción de nuevos hábitos sustentables.
- Apropiación del capital tecnológico, cultural y simbólico integrado al comedor.
- Fomento de nuevas capacidades y habilidades profesionales (empleos verdes).
- Generación, por medio de actividades abiertas ligadas al Desarrollo Sostenible, de un puente de integración entre la ciudad formal e informal.

Viviendas sustentables:
Cada vivienda nueva construida en el sector YPF del Barrio 31 cuenta, en promedio, con 1.1 kW de potencia fotovoltaica. Esta potencia por unidad funcional genera el equivalente a 1700 kWh anuales, lo que corresponde al 25% del consumo de una vivienda tipo totalmente eléctrica. La potencia total, distribuida en los techos de todos los edificios, es más que la que poseen muchas de las centrales fotovoltaicas del país; es decir, los edificios actúan como una pequeña central de energía solar.
El relevamiento de experiencias previas, indica que el pago de expensas en las viviendas de interés social (VIS) significaba un problema, dado que, la intermitencia laboral, el desempleo y la desigualdad económica, generan endeudamiento en el pago de expensas y conflictos en la comunidad. La falta de dicho ingreso por expensas produce el deterioro de los bienes y espacios comunes, disminuyendo la calidad de vida de la comunidad y deteriorando una inversión pública. La energía generada por la instalación fotovoltaica que es vendida a la distribuidora (según ley 27.424), genera un ingreso destinado a contribuir en a dicho problema, evitando el deterioro de los bienes y espacios comunes del edificio. Como se puede observar la generación distribuida no sólo aporta a la sostenibilidad energética y ambiental del barrio, sino que también permite la sustentabilidad de los espacios vecinales y consorciales aumentando su calidad de vida.
A su vez, las viviendas cuentan con un bombeo solar que es complementado con un sistema de calentamiento de agua que opera por gravedad y circulación termosifonica; es decir, que no requiere bombeo para su operación. Así, las nuevas viviendas del Barrio 31 permiten garantizar el aprovisionamiento de agua aún frente a cortes del suministro eléctrico. No se trata sólo de una aplicación sustentable que permite ahorro en dinero y generación limpia; es, además, un nuevo enfoque respecto al derecho a la Energía (el derecho al agua caliente, el derecho a una ducha cómoda) que es posible garantizar a través de esta aplicación tecnológica limpia y sustentable.
Las primeras instalaciones de energía solar fotovoltaica fueron realizadas previa a la sanción y reglamentación de la ley de generación distribuida. Aunque se mantuvo continuo contacto con los legisladores y funcionarios a cargo de su implementación, dicha instalación fue en muchos aspectos pionera, y su aplicación en los nuevos

edificios del Barrio 31 se fue consolidando conforme avanzó la tecnología y el mercado en Argentina durante esos años.
En la construcción del primer edificio de viviendas, existía poca experiencia de estas tecnologías en el país. La aplicación, entonces, tomó como referencia la de otros edificios de características edilicias similares, las cuales no tenían en cuenta los aspectos sociales particulares del caso, lo que se vio reflejado en una configuración técnicamente compleja, y en la correspondiente adopción de las mismas por parte de la comunidad. En dicha construcción se optó por tecnologías centrales para todo el edificio, de alta eficiencia, pero también de alta complejidad técnica; tecnologías que podrían haber resultado muy exitosas en edificios de clase media-alta, pero que en el Barrio 31 resultaban de compleja implementación.
En la construcción de los edificios subsiguientes, con el avance de la normativa técnica de generación distribuida en la ciudad, y junto con la experiencia previa, se llegó a la conclusión de que la eficiencia energética, el tamaño de la instalación y la temperatura del agua en los termotanques solares (aspectos clave en la mayoría de los sistemas de calentamiento de agua), no representaba el aspecto más importante en dicha aplicación. En cambio, el aspecto más importante resultó ser la simplicidad y robustez de los sistemas instalados; los sistemas térmicos debían funcionar sin recirculación, sin sensores ni electrónica, sin presurización, y con una única bomba que hiciera la elevación del agua. De esta manera se evitan averías (y, de haberlas, son fáciles de identificar y solucionar). Por lo que en contextos de vulnerabilidad social, la simplicidad, robustez y resiliencia de los equipos es más importante que su eficiencia.
Para lograr dicho objetivo no resultaba suficiente la incorporación de tecnología solar térmica a los edificios; sino que todo el diseño del edificio (desde las estructuras, los planos, las cañerías, etc.) debía estar pensado para incorporar dichas tecnologías. En los últimos edificios construidos, los sistemas de calentamiento de agua operan con una gran sencillez; el agua cae de manera directa (a través de caños de mayor sección, para evitar la caída de presión), con termotanques individuales cada dos viviendas, sin ningún apoyo más que la gravedad y el sol.
Los novedosos materiales de construcción, los cuales debido a que permiten realizar una rápida construcción, son utilizados frecuentemente en la construcción de viviendas en countries y barrios cerrados. Se trata de materiales de elevadas prestaciones constructivas desde cualquier perspectiva. Sin embargo, tras la finalización del primer edificio, por el contrario, la percepción por parte de los vecinos fue que se les entregaba una construcción de calidad inferior. La queja, principalmente, radicaba, además de la falta de seguridad previamente mencionada, y en el concepto del uso de “madera y telgopor” como materiales. El valor social del ladrillo, el ladrillo como elemento tras generación al de ahorro se veía en jaque con el uso de este tipo de viviendas que no eran de ladrillos.
Debido al nuevo método mixto de construcción se pudo observar que estructura de hormigón permitió la mejora del edificio en tres aspectos: brindar la seguridad y comodidad buscada por los vecinos; al tener un muro portante interno del edificio, el mismo servía de apoyo para estructuras pesadas (como los termotanques solares); por último, los muros internos de hormigón permiten mantener una alta inercia térmica en las viviendas. Estas características de la estructura junto con la aplicación de las ventanas y postigos de chapa permiten minimizar el aporte energético para calefacción y refrigeración, aprovechando la luz natural y minimizando el consumo de energía para

iluminación, respetando los deseos de los vecinos en términos de materiales y seguridad.

CONCLUSIONES

Al analizar los resultados de estos proyectos podemos determinar en primera instancia que las intervenciones de sostenibilidad (en energía, alimentación, etc) permiten resolver problemas de acceso y a su vez generar un círculo virtuoso de eficiencia.
En cuanto a la apropiación social de las tecnologías es importante destacar que al ser un cambio de paradigma requiere un seguimiento y una capacitación, pero que en muchas situaciones donde el acceso era limitado o nulo estas tecnologías se adaptan fácilmente dado que no hay un sesgo por tecnologías anteriores. Sin embargo, es fundamental que los sistemas que se diseñen para cumplir este fin (resolver problemas de acceso en barrios vulnerables) deben ser pensados desde la sencillez en desmedro de la eficiencia, mediante la utilización de tecnologías pasivas. Se busca minimizar roturas y que, de ocurrir, estas puedan ser resueltas localmente, sin necesidad de repuestos o aporte de expertos ajenos a la comunidad local.
En las nuevas viviendas del Barrio 31 construidas en el sector YPF los muros envolventes permiten aislar la temperatura exterior, mientras que los muros interiores permiten dar seguridad, resistencia mecánica, y acumulan calor que liberan en las horas de más frío, disminuyendo la variación de temperatura entre día y noche. Los sistemas de energía renovable implementados son simples, robustos, de fácil operación y mantenimiento, lo que favorece su adopción.
Sin lugar a duda, la combinación de estos sistemas es una innovación surgida del intercambio y el diálogo con los receptores de la vivienda. La relación con la población objetivo, el conocimiento de sus costumbres y hábitos permitió una aceptación de la propuesta y además una mejora técnica cualitativa.
En ambos casos - Barrio 31 y el Biosistema- el resultado de la combinación de nuevas tecnologías constructivas y energéticas con las prácticas y hábitos históricos de la población receptora permitió un replanteo y un ejercicio de reflexión para poder lograr el éxito, que se traduce en edificios energéticamente eficientes y con tecnologías socialmente adoptadas.
Entendemos también que este tipo de intervenciones "*no se trata sólo de una aplicación sustentable que permite ahorro en dinero y generación limpia; es, además, un nuevo enfoque respecto al derecho a la Energía (el derecho al agua caliente, el derecho a una ducha cómoda) que es posible garantizar a través de esta aplicación tecnológica limpia y sustentable"*.
Todas estas intervenciones representan un camino de construcción social y apropiación territorial, generando una sociedad más sustentable en lo ambiental, y más justa en el aspecto social. Más allá de los aportes propios de las tecnologías e instalaciones realizadas en pos de la sustentabilidad, es importante destacar que estos proyectos funcionan a su vez como espacios de educación, concientización y pilotos para la investigación ambiental, y sirven de experiencia para replicar las intervenciones realizadas en diferentes barrios y espacios.

REFERENCIAS

RENABAP (Registro Nacional de Barrios Populares):
https://www.argentina.gob.ar/desarrollosocial/renabap/tabla

Certificados EDGE de las nuevas viviendas construidas en Barrio 31: “Preliminary EDGE Certificate for the Vivienda Nueva YPF project”

Reporte “Viviendas Sustentables en el Barrio 31”, de la Secretaría de Integración Social y Urbana, entregado a la Cámara de Comercio Argentino-Británica para la VII Edición del “Premio CCAB al Liderazgo Sostenible” (donde el proyecto ganó el premio en la categoría Sector Público).

Sitio web del Club de Roma: http://www.clubderoma.org.ar/barrios-informales/

Redes Sociales: https://www.instagram.com/cdrarg/

https://www.facebook.com/Cap%C3%ADtulo-Argentino-del-Club-de-Roma-475843562448194

Se realizaron entrevistas al Director del Capítulo Argentino del Club de Roma, Gonzalo del Castillo.

ANÁLISIS PRELIMINAR DEL CAMPO ELÉCTRICO Y DATOS DEL GOES 16 SOBRE 4 TORMENTAS EN ARGENTINA

Velazquez Y. R.[a]

[a] *Depto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: yasmin_rv@outlook.com

RESUMEN

El campo eléctrico (E o -PG) atmosférico medido sobre la superficie terrestre presenta una fuerte respuesta a los procesos de electrificación de las nubes cercanas. Estos procesos se encuentran relacionados a las distintas fases del desarrollo de las tormentas y su composición microfísica en general. Por otro lado, en las últimas décadas el uso de información satelital ha permitido caracterizar con mayor detalle la estructura espacial y temporal de las nubes de tormenta. La búsqueda de una relación entre mediciones de PG en superficie y distintos productos satelitales podría resultar útil para comprender como reacciona el campo eléctrico frente a variaciones en la microfísica de las nubes. El objetivo de este trabajo es la búsqueda de patrones en los datos de PG que acompañen los procesos que se observan al analizar los datos satelitales. Para esto se analizaron 4 situaciones en los que el campo eléctrico atmosférico alcanzo valores del orden de 1 kV/m y presencia de descargas. De la variación con el tiempo de la temperatura de brillo mínima del canal 10.35 µm se pudo extraer que la amplitud y frecuencia alta de PG se asocian la intensificación de los sistemas. También se observó en los mismos intervalos de tiempo un aumento de las áreas asociadas a distintos umbrales de temperatura y disminución en la concentración de los cristales al inicio de cada intervalo. De esta manera, la frecuencia e intensidad de PG son capaces de dar una idea de la profundización y variación del área del sistema.

Palabras Clave: Electrificación, Convección, GOES, microfísica.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones del campo eléctrico atmosférico (E) o el gradiente del potencial (E=-PG) en días de tormenta son muy importantes tanto en amplitud como en frecuencia temporal. Los cambios observados pueden deberse a descargas eléctricas o al pasaje de nubes con núcleos de carga intensa. La diferencia entre ambos eventos radica principalmente en la magnitud y en la escala temporal de las variaciones observadas de PG. La variación de PG durante una descarga eléctrica es mucho más grande que la asociada al pasaje de una nube electrificada. Esto se debe a la velocidad que tiene una descarga eléctrica, donde el intercambio de cargas entre la nube y la tierra u otra nube se produce en menos de 1 segundo (Martinez, 2014; García, 2002). Por otro lado, la variación de PG frente al pasaje de una nube cargada va a depender de la tasa con que se generan las cargas (García, 2002; Bennet, 2007). Esto resulta en un cambio más paulatino en frecuencia que en el caso de las descargas. La tasa de electrificación va a depender de la concentración y la interacción entre las partículas sólidas en la nube que a su vez está íntimamente asociado a la intensidad de la ascendente de forma

exponencial (Price and Rind, 1992). Los procesos microfísicos terminan siendo muy influyentes en las mediciones de PG.

Por otro lado, el conocimiento sobre el tiempo severo es cada vez más completo gracias al análisis de la información satelital. Esta evoluciona cada vez que se aumenta la resolución espacial, temporal o espectral. El aprovechamiento de la interacción entre la radiación electromagnética y los componentes atmosféricos ha permitido un mejor entendimiento de los procesos internos de las nubes. En la década del 80, diferentes autores (Cherna, 1985; Adler 1988) comenzaron a utilizar la temperatura de brillo en el infrarrojo (10.5-12.6 μm) del GOES para estudiar la convección. Mas tarde Roberts y Rutledge (2003) hallaron que estudiar la tendencia de la temperatura de brillo en el infrarrojo permite tener un tiempo de anticipación de hasta 30 minutos frente a fenómenos de tiempo severo.

Wang y otros (2006) estudiaron la relación entre descargas eléctricas, reflectividad, temperatura de brillo de tope de nube y precipitación intensa luego del pasaje de un tifón con el fin de evaluar modelos numéricos. Los autores encontraron que existe una marcada relación entre zonas con topes nubosos muy fríos, reflectividades muy alta y cantidad de descargas totales. La nueva generación de GOES-R con mayor cantidad de canales y mejor resolución espacial y temporal, además de información sobre las descargas, le permitió a Ribeiro y otros (2019) realizar una evaluación del "rapid scan" para propósitos de nowcasting. Ellos encontraron que una rápida caída en las temperaturas de brillo en el canal 10.35μm se encuentra acompañada de un incremento en la cantidad de partículas de hielo y en una profundización de los sistemas de tormenta. En cuanto a las partículas de hielo se pudo apreciar su cambio aplicando diferencias de temperaturas de brillo (DBT), mientras que la profundización se monitoreo con el mismo canal de 10.35μm y con una diferencia de temperatura.

El PG es una variable que contiene información no solo de las descargas en sí mismas sino también de la interacción entre partículas cargadas en la tormenta. Según la región de la tormenta se pueden encontrar diferentes características eléctricas. Debido al importante rol de las partículas de hielo en los procesos de electrificación de las nubes, el estudio del PG puede aportar otro punto de vista al entendimiento de la estructura interna de los sistemas, siendo un complemento de la información satelital.

El objetivo de este trabajo es analizar las variaciones del PG frente a distintas situaciones de convección húmeda profunda en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Para lograr este objetivo se relacionarán mediciones de PG realizadas en una estación en superficie y se buscarán patrones que respondan a distintos procesos dentro de las nubes, obtenidos a partir de información satelital. Se utilizarán canales y una de las DBT propuestas por Ribeiro y otros (2019) para describir los distintos procesos físicos dentro de las nubes.

Se eligieron 4 casos de estudio que representan situaciones de convección diferente. Con las mismas características se podrían representar conjuntos diferentes de tormentas. Al estudiar el comportamiento de PG en circunstancias diversas y hallar similitudes en términos eléctricos podría extrapolarse a otras tormentas similares.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: La segunda sección describe los datos utilizados y la metodología propuesta. En la tercera sección, se presenta un análisis de los 4 eventos de convección seleccionados que se desarrollaron sobre la zona a estudiar. Los resultados y la discusión se presentarán en la última sección.

DATOS Y METODOLOGÍA

Las mediciones de PG se realizan en el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa – CITEDEF desde el año 2017. La Fig. 1 muestra la ubicación en la que se encuentra el instituto. El instrumento utilizado es el CS110 de Campbell Scientific. Cada medición se obtiene con una frecuencia de 5 segundos. Se graficará la serie original para apreciar los intervalos en los que hubo mayor actividad de PG. También se realizarán gráficos de la serie de PG promediada cada 1 minuto para tener una frecuencia temporal más parecida a las mediciones satelitales.

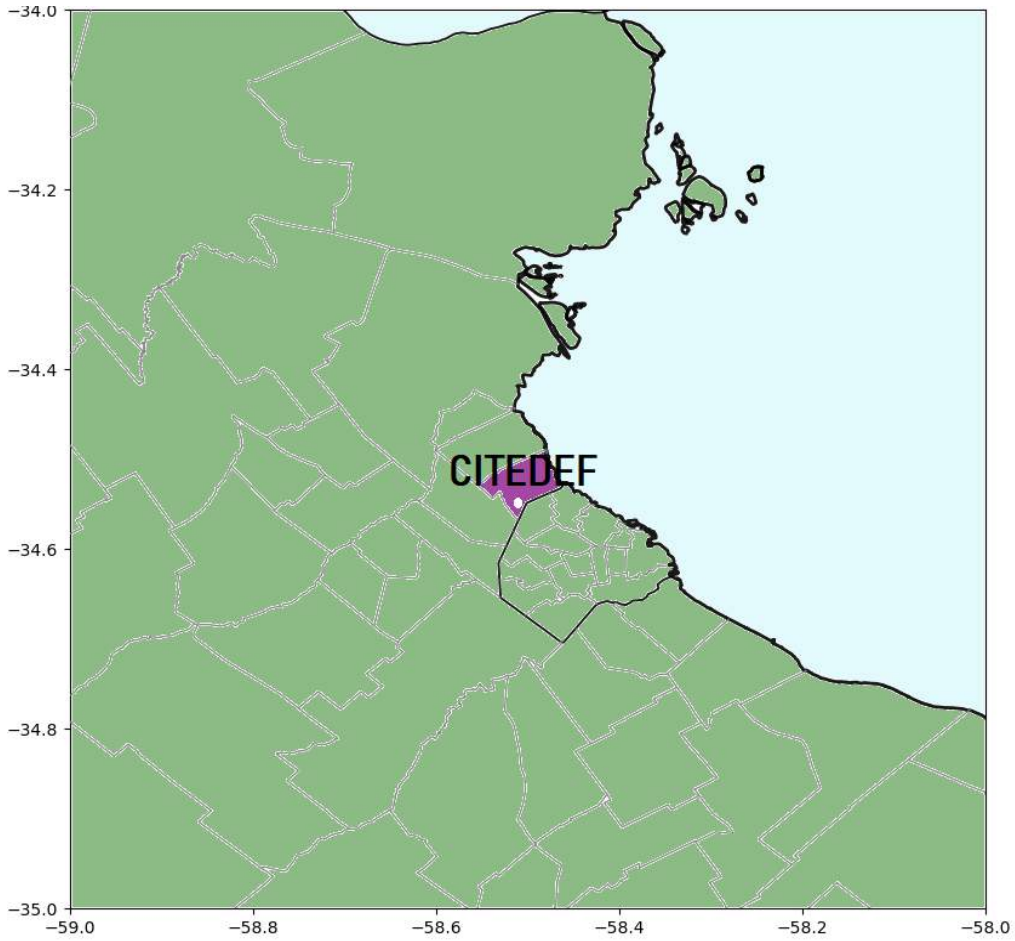


Figura 1. Ubicación del CITEDEF.

Se eligió el primer caso (3 de marzo de 2017) ya que el lapso de tiempo en el que PG oscila del orden del kV/m es corto. El segundo caso (9 de julio de 2017) se eligió ya que es una tormenta en invierno y además alcanzó un valor muy alto de PG. El tercero (10 de noviembre de 2018) por ser la fecha con más descargas detectadas y acumulado de precipitación (116mm entre las 6 UTC del 10 y las 00 UTC del 11). Por último, el cuarto caso (13 de diciembre de 2018) se eligió por ser una fecha con reporte de granizo en Aeroparque y acumulado de precipitación importante (71mm entre las 12 UTC del 13 y las 00 UTC del 14).

Con el fin de analizar el entorno convectivo presente durante las mediciones de PG de interés, se utilizaron datos del sensor ABI perteneciente al GOES 16. Específicamente

se utilizaron las temperaturas de brillo (Tb) observadas por los canales de 8.5µm, 10.33µm y 11.2 µm, las cuales tienen 2 km de resolución. En las primeras dos tormentas analizadas el satélite se encontraba en la posición de testeo en 89.3°O, mientras que en las otras dos el satélite ya se encontraba en la posición actual (75.2°O).
La diferencia entre el canal de 8.5 µm y 11.2 µm es usado para monitorear el tamaño de los cristales de hielo del tope. La magnitud de la variación está relacionado al radio efectivo de las partículas de hielo. Esto se relaciona con la efectividad para absorber la radiación que tienen los cristales, cuanto mayor es el radio aumenta la absorción. Los valores positivos se asocian a contenidos de hielo y cuanto más grande es el tamaño es menor el valor de la DBT (Ackerman, 1990; Ribeiro, 2019). Los cristales juegan un rol importante en la electrificación de las nubes, por lo cual resulta importante estudiar cómo es su evolución a la par de la profundización del sistema.
Para analizar la profundidad del sistema se buscó el pixel con el valor mínimo de temperatura de brillo (Tb) en un radio de 50 km respecto del CITEDEF en el canal de 10.33 µm para los 4 eventos. Valores bajos en este canal se asocian a nubosidad profunda (Ribeiro, 2019). Esto es simplemente porque la temperatura decae con la altura dentro de la troposfera. Además, se asume que el sistema más profundo es el que más influye en el PG debido a que es el que más interacción de cargas tiene.
Con el fin de estimar el área de nubosidad de interés, se calcularon la cantidad de pixeles en los cuales la Tb en un radio menor a 50 km es menor a 241 K, 235K, 221K, 201K. Se estimaron las áreas de cada pixel calculando la distancia entre el punto j-1 y j+1, dividiéndolo por 2 y asignándolo al punto de retícula j. Este procedimiento se realizó para la matriz de latitudes y longitudes dentro del área de estudio. Para el cálculo de las distancias se utilizaron las siguientes aproximaciones: 1° de longitud = 111km* sen Φ, donde Φ es la latitud media entre los puntos j-1 y j+1, y 1° de latitud= 111 km. Por último, se multiplicó la matriz de distancia zonal y meridional.

RESULTADOS

Se definirá como oscilaciones rápidas de PG a aquellas con frecuencias mayores a 1 onda por hora en la serie original. Las amplitudes de PG se denominarán grandes cuando ronden el orden de 1kV/m también hablando en términos de la serie original. Esto se analizará de forma cualitativa mirando los gráficos.
Para poner en contexto cada situación en la Fig. 2 se muestra una imagen correspondiente del canal de 10.35 µm para cada uno de los eventos. En la Fig. 2.a se puede apreciar sistemas convectivos de gran extensión sobre el oeste y norte del país. Mientras que sobre la región de estudio se observa algo más localizado y menos intenso. En la Fig. 2.b se observa que el segundo evento no es tan profundo como el primero ya que las Tb son más altas, pero la extensión del sistema es mayor sobre la región a estudiar. En la Fig. 2.c se observa un sistema de gran extensión que se propaga sobre la región de estudio. Se pueden apreciar topes muy fríos y overshooting tops indicando la presencia de una ascendente muy intensa. Esto a su vez se asocia a una posible ocurrencia de fenómenos severos. Una situación muy similar se puede observar en la Fig. 2.d. Se observan sistemas muy intensos que presentan overshooting tops bien definidos propagándose sobre la región de estudio.

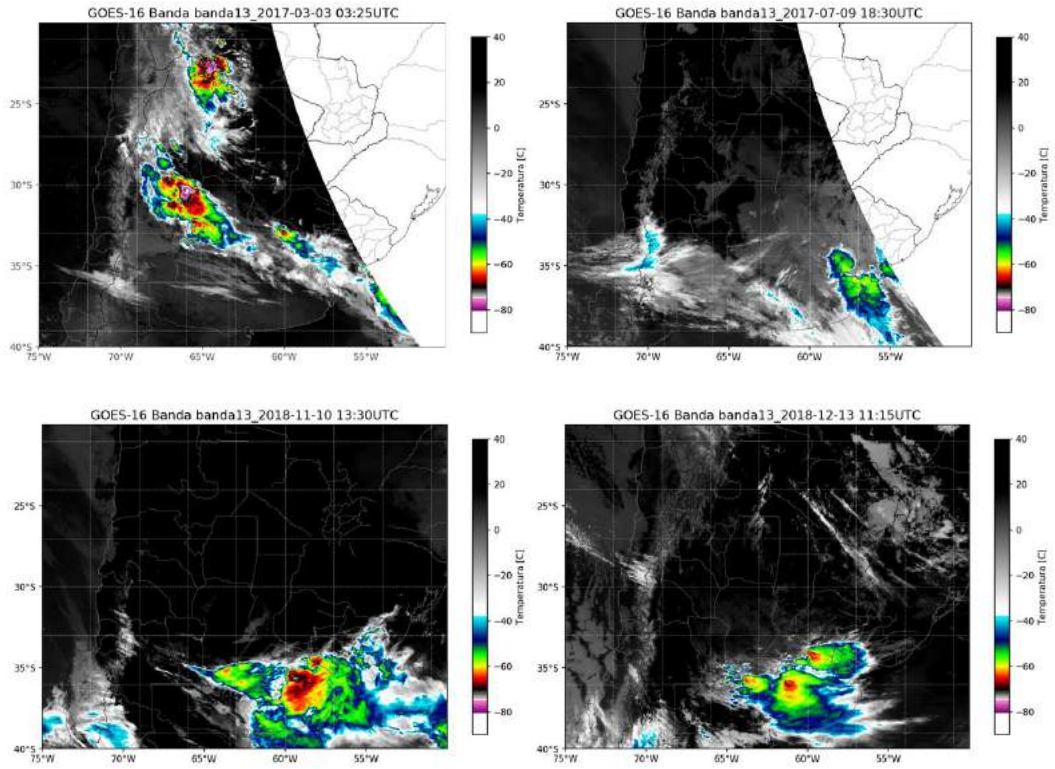


Figura 2. Caso 1: Panorama general panel superior izquierdo (a); Caso 2: Panorama general panel superior derecho (b); Caso 2: Panorama general panel inferior izquierdo (c); Caso 4: Panorama general panel inferior derecha (d).

La Fig. 3 muestra la variación temporal del mínimo de la Tb del canal 13 (10.35 µm) dentro de un radio de 50 km respecto del CITEDEF y la variación temporal del PG. Se pueden observar 4 paneles (a-d), uno para cada una de las situaciones. En rasgos generales se observa mínimos relativos en la Tb cuando las oscilaciones son más rápidas (áreas sombreadas en celeste). Tampoco se observa que la Tb supere los -50 °C durante las oscilaciones de PG al rondar el kV/m.

En el primer caso (ver Fig. 3 a) se observa que la tendencia general es de un aumento de la Tb, pero se produce una caída de 5°C cuando se observa la caída del PG. En el caso 2 (ver Fig. 3 b) se observa una recuperación de Tb luego de las 15.30 cuando el PG oscila con amplitudes chicas. A las 16.30 se empieza a ver una caída de Tb de casi 8°C, momento en el que comienzan las oscilaciones de gran amplitud y el valor de Tb se mantiene cerca de -60 °C mientras las variaciones tenían amplitudes del orden del kV/m y una frecuencia muy alta (entre las 17.20 y 19.30 UTC aproximadamente). El caso 3 (ver Fig. 3 c) tiene valores de Tb que oscilan alrededor de -70°. Entre las 8 y 14 UTC se observan mínimos relativos cuando las oscilaciones tienen frecuencias muy altas y las amplitudes rondan el kV/m. Luego las oscilaciones bajan su frecuencia por momentos y aumentan en otros. En el caso 4 los valores de Tb rondan los -60 ° C entre las 10 y 22 UTC. Los mínimos relativos parecen asociarse en su mayoría a oscilaciones rápidas y con las amplitudes del orden del kV/m.

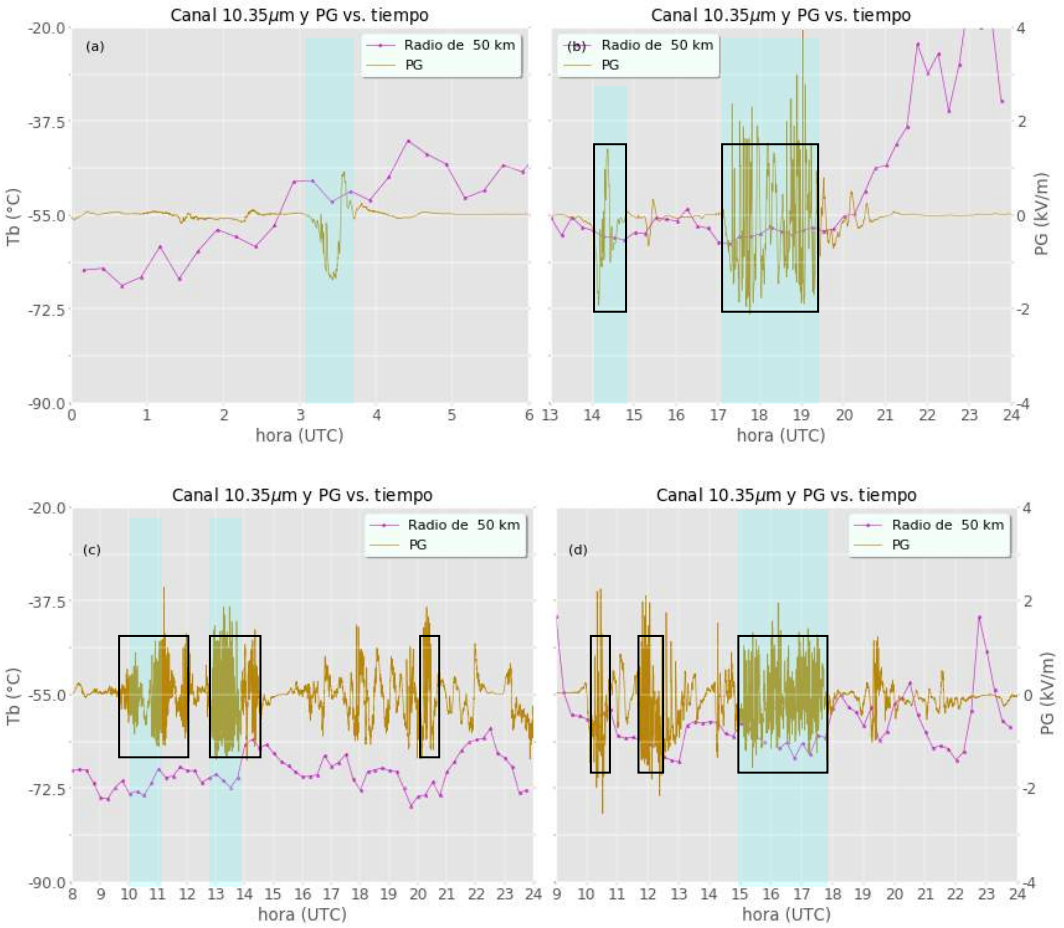


Figura 3. Variación temporal del mínimo de Tb dentro de un radio de 50 km y la variación temporal de PG (beige) para los 4 eventos. Las áreas sombreadas en celeste corresponden a intervalos con oscilaciones rápidas e intensas de PG. Los recuadros corresponden a intervalos con mayor frecuencia de PG.

La Fig. 4 muestra el promedio de PG cada 1 minuto y las áreas con Tb menores a 241 K, 235 K,221 K y 201 K en distintos colores. A su vez se presentan 4 paneles (a-d) asociado a cada evento. Excepto en el primer caso (ver Fig. 4 a), se observa que las áreas con temperaturas menores a 241 K, 235 K y 221 K tienen valores muy similares. Los mínimos relativos de esas 3 curvas suelen asociarse a los intervalos en los que las oscilaciones del PG tienen amplitudes de órdenes del V/m (sombreado azul) o con frecuencias muy bajas (sombreado violeta). Al ver la curva de PG promediada cada 1 minuto se puede apreciar que los máximos de las curvas de las áreas se dan cuando hay oscilaciones del orden de 1 kV/m. Al haber promediado ya no se pueden apreciar donde empiezan y terminan los intervalos con frecuencias altas en el panel c y d.

Si se lo compara con la serie de PG vista en la Fig. 3 se ve una relación más clara con un comportamiento similar a una envolvente. La curva asociada al área con temperaturas menores a 201 K en el panel a, b y d tiene un valor nulo, mientras que en el panel 3 su comportamiento se diferencia. En este evento se logran detectar temperaturas por debajo de 201 K, siendo el evento con Tb más bajas como se vio en la Fig. 3.c.

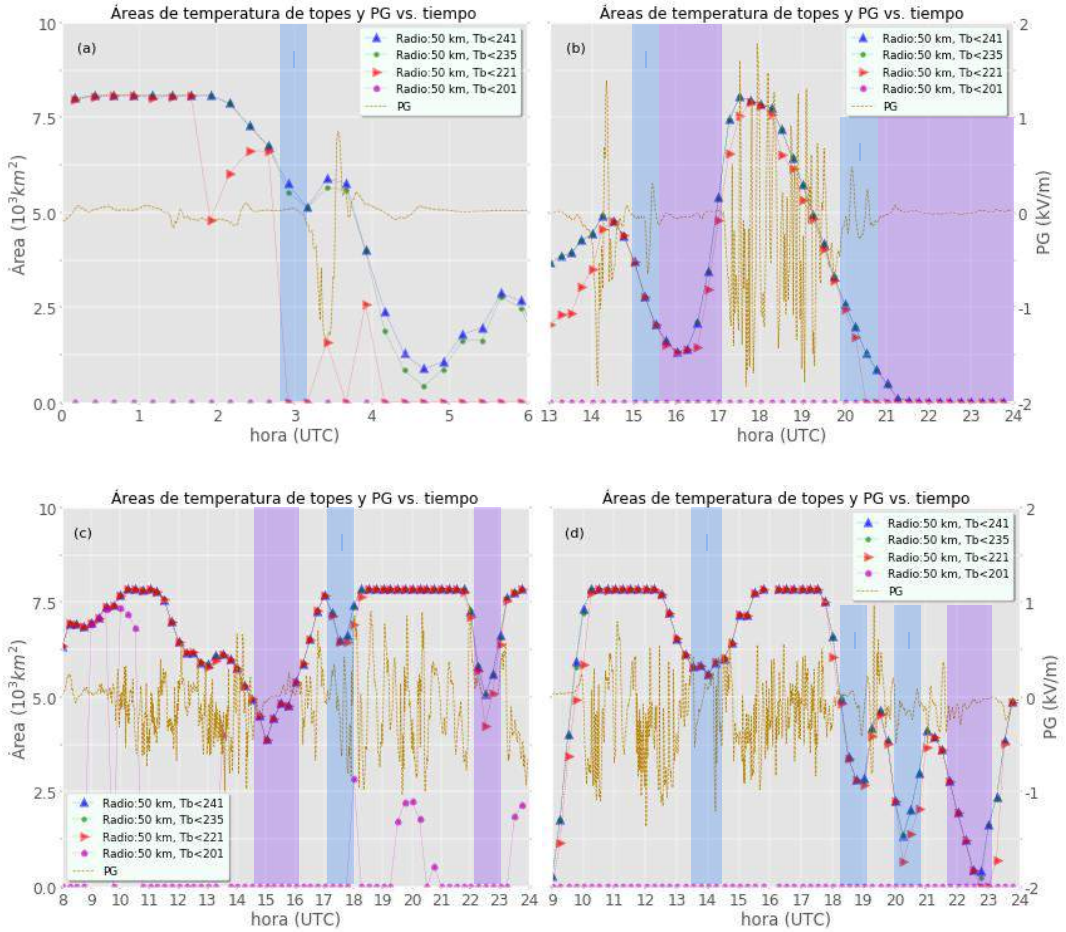


Figura 1. Variación temporal de las áreas con Tb menor a 241 K, 235 K,221 K y 201 K dentro de un radio de 50 km respecto del CITEDEF y el promedio de PG cada 1minuto (beige) para los 4 eventos. Las áreas sombreadas en celeste corresponden a intervalos con amplitudes de PG menor a 1kV/m. Las áreas sombreadas en violeta corresponden a intervalos con oscilaciones de PG más lentas.

En la Fig. 5 se observan los valores máximos de la DTB entre el canal de 8.5µm y 11.2µm dentro de un radio de 50 km respecto del CITEDEF y el promedio de PG cada 1 minuto. Se muestran 4 paneles que corresponden uno a cada situación a analizar. Se pueden observar caídas en los valores de la DBT cuando el PG pasa de un régimen con oscilaciones despreciables (del orden del V/m, área sombreada) a oscilaciones del orden del kV/m. Implicando el aumento del tamaño de los cristales.

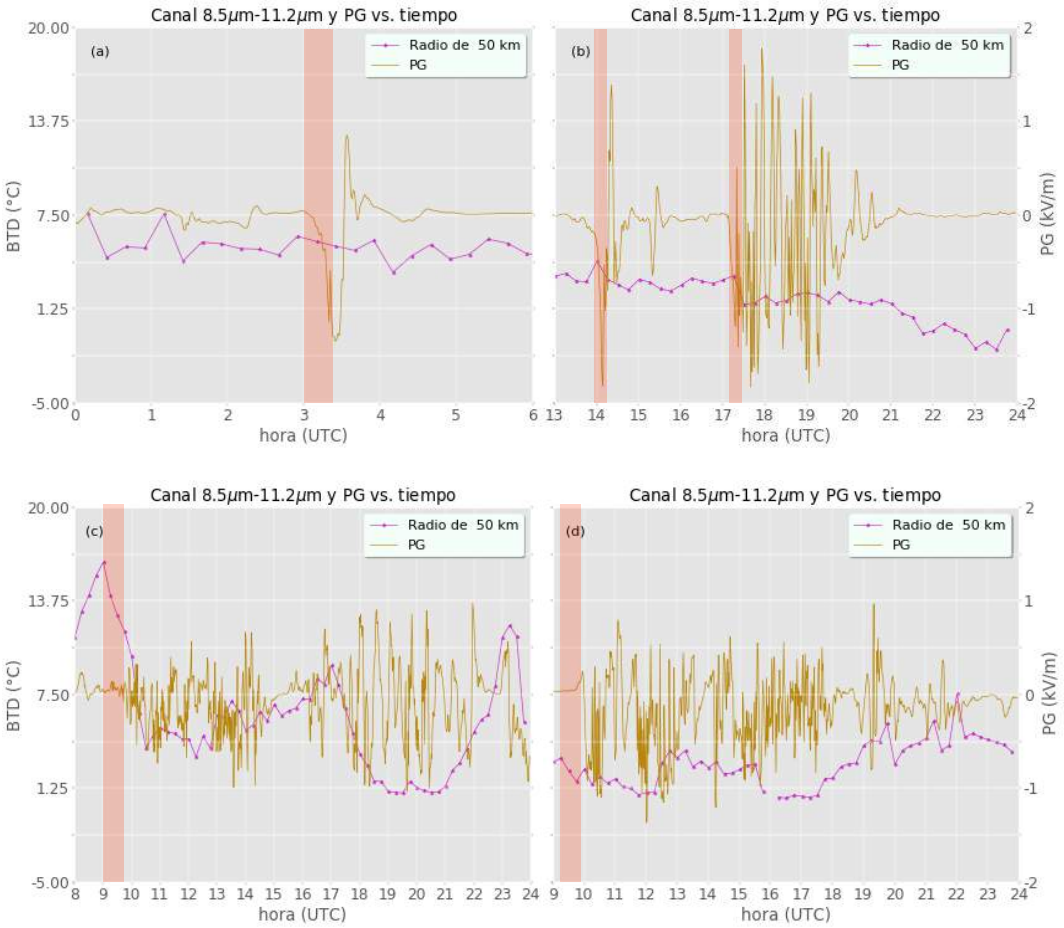


Figura 1. Variación temporal del máximo de la diferencia entre el canal de 8.5µm y 11.2µm dentro de un radio de 50 km y el promedio de PG cada 1minuto (beige) para los 4 eventos. Las áreas sombreadas en rosado corresponden a la caída de la DTB antes del cambio de magnitud del PG.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En este trabajo se compararon Tb, áreas definidas por umbrales de Tb y una DBT con datos de PG a la espera de observar patrones en esta variable que se relacionaran con los procesos conocidos desde el punto de vista satelital.

En los casos de estudio analizados, se observa que cuanto menor fue la Tb en 10.35 µm que se alcanzó, mayor frecuencia de oscilación tuvo PG. La Tb en 10.35 µm esta originada en la emisión del tope nuboso que se encuentra a temperaturas más bajas.

Esto puede ser un indicador de que la profundización del sistema puede deducirse a grandes rasgos viendo la frecuencia de PG. Donde se ve una mayor actividad de las cargas se relacionaría a momentos de mayor profundización y se puede pensar que la curva de Tb mínima tendría una forma similar a la parte superior de una envolvente. Se pudo ver que al bajar la resolución de PG se pierde en el evento 3 y 4 la diferenciación entre intervalos de mayor actividad.

Se percibe una disminución del área de cada sistema en los intervalos en los que el PG presenta valores del orden del V/m u oscilaciones de amplitudes y frecuencia chica, acompañado por un posterior aumento del área en cuanto el PG comienza a aumentar en

módulo. Esto no se pudo observar en las primeras horas del caso 1. De esta manera, la magnitud del PG podría ser un indicador de la expansión del tope de nube al menos en un radio de 50 km si la tormenta es moderada o intensa. La variación del área también tiene similitud a como se comportaría la parte superior de la envolvente de la onda de PG.

La DBT analizada, ("Tamaño de partícula": 8.5μm-11.2μm) muestra una disminución en la concentración de cristales pequeños previo a oscilaciones de gran amplitud y frecuencia de PG. Esto podría darse debido al crecimiento de otras partículas a expensas de los cristales, lo que aumentaría la probabilidad de choques y el aumento de las cargas. El PG es una variable que se encuentra fuertemente relacionada con el ciclo de vida de una tormenta. Si bien los patrones identificados ya son conocidos gracias a la información satelital, esta variable podría dar información sobre lo relacionado a las regiones de carga intranube, por ejemplo. Al final de la vida de tormentas de masa de aire tropical se identificó un patrón de oscilación en el PG el cual estaría asociado a un cambio en la polaridad de la tormenta debido al debilitamiento de la ascendente (Pawar, 2007). Hacer un estudio con un mayor número de tormentas y con información de otros canales y el sensor GLM podrían mostrar que esta variable puede ser un complemento interesante para entender un poco más la parte eléctrica y como esta acompaña las etapas del ciclo de vida de las tormentas.

Otro punto a destacar es que las mediciones de PG pueden realizarse de forma local en intervalos temporales pequeños de hasta 5 segundos, mientras las imágenes de GOES 16 se toman cada 10 minutos y demoran un tiempo adicional en ser procesadas. Esto hace que la medición del PG resulte un producto interesante en el marco del pronóstico inmediato.

REFERENCIAS

Adler, R. F., & Negri, A. J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, 27(1), 30-51 (1988).

Ackerman, S. A., Smith, W. L., Revercomb, H. E., & Spinhirne, J. D. The 27–28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8–12 μm window. *Monthly Weather Review*, 118(11), 2377-2388 (1990).

Bedka, K. M., Wang, C., Rogers, R., Carey, L. D., Feltz, W., & Kanak, J. Examining deep convective cloud evolution using total lightning, WSR-88D, and GOES-14 super rapid scan datasets. *Weather and Forecasting*, 30(3), 571-590 (2015).

Bennet A.J. y Harrison R.G. Atmospheric electricity in different weather conditions. *Weather* 62 (10), 277–283 (2007).

Cherna, E., Bellon, A., Austin, G. L., & Kilambi, A. An objective technique for the delineation and extrapolation of thunderstorms from GOES satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90(D4), 6203-6 (1985).

Dwyer, J. R., & Uman, M. A. The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4), 147-241 (2014).

García-Miguel Fernández-Montes, J. A. El campo eléctrico atmosférico y su variación. *Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones* (2002).

Martinez-Lozano. Medición del campo eléctrico atmosférico en la ciudad de león: establecimiento de límites para prevención ante la ocurrencia de descargas atmosféricas. 10.13140/2.1.3635.2323 (2014).

Price, C., & Rind, D. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 97(D9), 9919-9933 (1992).

Pawar, S. D., & Kamra, A. K. End-of-storm oscillation in tropical air mass thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112 D3 (2007).

Ribeiro, B. Z., Machado, L. A., Huamán Ch, J. H., Biscaro, T. S., Freitas, E. D., Mozer, K. W., & Goodman, S. J.. An Evaluation of the GOES-16 Rapid Scan for Nowcasting in Southeastern Brazil: Analysis of a Severe Hailstorm Case. *Weather and Forecasting*, 34(6), 1829-1848 (2019).

Roberts, R. D., & Rutledge, S. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 18(4), 562-584 (2003).

Tacza J. et al. A new South American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 120, 70-79 (2014).

Wang, K. Y., & Liao, S. A. Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2–4 July 2004 severe convective system over Taiwan area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111 D5 (2006).

ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE EMISIÓN ACÚSTICA

Vesga-Ramírez A[a,b], Camilion E.[c] *y* Gómez M. P.[ab]

[a] *Grupo de Ondas Elásticas, ICES, CAC, CNEA, ARGENTINA*
[b] *Grupo de Emisión Acústica, FRD, UTN, Campana, ARGENTINA*
[c] *YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA*

e-mail: alejandravesga@cnea.gov.ar

RESUMEN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno en el cual, a expensas de una solicitación, un material libera energía en forma de ondas elásticas. Estas ondas son producidas por un mecanismo, denominado fuente de EA, activado al recibir alguna clase de energía. De esta manera, al inducir inestabilidades dentro de un material, por ejemplo, mediante una carga mecánica, pueden ocurrir efectos como la reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. Estas actuarán de fuentes de EA las cuales pueden ser detectadas y localizadas a partir de colocar sensores en la superficie del material estudiado. Identificar con precisión la ubicación de fracturas y daños microscópicos es la base científica para investigar el mecanismo de falla de materiales. Por tanto, localizar fuentes de EA puede ser crucial para predecir y controlar potenciales daños. El caso de interés del presente estudio es el desarrollo y prueba de algoritmos para la localización 3D de fuentes de EA. Para esto se simplifica el modelo de fuente, utilizándose una del tipo de Hsu Nielsen para generar pulsos en la superficie de un cubo de hormigón construido para este trabajo. Se utiliza hormigón por su semejanza con la roca, dado que este trabajo se enmarca en una tesis de doctorado en la cual se estudia la EA en rocas. Se presentan los resultados de la localización de EA, la cual está basada en el registro de los tiempos de arribo de las señales de EA, producidas por la fuente simulada, en varios sensores ubicados sobre la superficie del cubo. El algoritmo de localización, basado en el método de Geiger, se implementó en tres diferentes etapas: establecimiento de funciones de tiempo de arribo, preparación de los datos y linealización del problema. Así mismo, este trabajo presenta los factores que influenciaron la precisión de la localización, ventajas y desventajas con respecto a otros métodos, así como una discusión de los retos actuales en localización de fuentes de emisión acústica.

Palabras Clave: Emisión acústica, Hormigón, Mecanismos de falla

INTRODUCCIÓN

Localizar fuentes de emisiones acústicas (AE) es un método de ensayo no destructivo que se utiliza ampliamente en muchas aplicaciones, incluyendo túneles, minería de profundidad, industrias petroquímica y aeroespacial (Guo et al, 2020; Cai et al, 2019; Zhou et al, 2019; Zacarias et al, 2013; Muzet et al, 2007). Identificar con precisión la ubicación de fracturas y daños microscópicos es la base científica para investigar el mecanismo de falla de materiales, prediciendo explosiones de rocas y operando con seguridad grandes equipos industriales (Holford et al, 2017; Qi et al, 2020; Li et al, 2019; Fredianelli et al, 2020; Bolognese et al, 2020). Por lo tanto, vale la pena desarrollar un método de localización de fuentes de AE de alta precisión.

Los métodos de localización más usados usualmente están basados en el método clásico propuesto por Geiger en 1910 (Geiger,1910; Geiger,1912). Sin embargo, solo hasta finales de 1970, con el rápido desarrollo de la computación, el método de Geiger fue aplicado al campo de la localización de fuentes de microsismica/EA (Mowrey G,1975). La principal idea del método de Geiger es linealizar el problema, haciendo que el residuo del tiempo de llegada de la onda alcance un mínimo con cierta precisión (mediante el uso de cálculos iterativos), y finalmente obtener las coordenadas de la fuente (Dong et al, 2019)

METODOLOGIA

Algoritmo de localización

El método Geiger es una aplicación del método de Gauss-Newton, un algoritmo clásico para solucionar problemas no-lineales. Está basado sobre un punto inicial dado y a partir de este obtener el resultado a través de varias iteraciones. Definamos $F_i(m)$ como la función del tiempo de arribo en un sensor, donde $m = (x, y, z, t)$ son las coordenadas del evento y t el tiempo de origen del evento de EA. Si expandimos $F_i(m)$ a una localización cerca, m_0, y expresamos la expansión por el primer polinomio de primer grado de Taylor:

$$F_i(m) = F_i(m_0 + \delta m) = F_i(m_0) + \frac{\delta F_i}{\delta x}\delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y}\delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z}\delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t}\delta t \qquad (1)$$

Donde

$m = m_0 + \delta m$

$m_0 = (x_0, y_0, z_0, t_0)$ es convencionalmente llamado *solución de prueba o solución trial*

El término de la izquierda de la ecuación (1), $F_i(m_0 + \delta m)$, representa el tiempo de arribo registrado en el sensor i. El significado físico de la ecuación (1) es que el tiempo observado es expresado por el tiempo de arribo calculado a partir de una localización cercana y por:

$$\frac{\delta F_i}{\delta x}\delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y}\delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z}\delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t}\delta t \qquad (2)$$

un factor de corrección, el cual está en función de las derivadas parciales de los parámetros del hipocentro.

Si reorganizamos la ecuación (1) en la forma:

$$\Delta d = \frac{\delta F_i}{\delta x}\delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y}\delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z}\delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t}\delta t \qquad (3)$$

Donde $\Delta d = F_i(m) - F_i(m_0)$

En notación de matrices tenemos lo anterior como

$$\begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta d_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & G_{n4} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \\ \Delta m_3 \\ \Delta m_4 \end{Bmatrix}$$

Es decir

$$\Delta d = G\delta m \tag{4}$$

Donde $G = \begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta x} & \frac{\delta F_1}{\delta y} & \frac{\delta F_1}{\delta z} & \frac{\delta F_1}{\delta t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\delta F_m}{\delta x} & \frac{\delta F_m}{\delta x} & \frac{\delta F_m}{\delta x} & \frac{\delta F_m}{\delta x} \end{bmatrix}$

La solución por mínimos cuadrados satisface el sistema definido por la ecuación (4)

$$\delta m = (GG^T)^{-1}G^T\Delta d \tag{5}$$

Implementación del Algoritmo

El algoritmo del método de Geiger discutido anteriormente fue desarrollado para funciones que estiman tiempos de arriba, es decir, podemos usar este algoritmo para cualquier función de tiempo de arribo hasta que las funciones y sus derivadas parciales pueden ser evaluadas. A continuación, discutiremos la implementación del método de Geiger para un evento de Emisión Acústica.

La implementación del método de Geiger fue realizada en tres principales pasos. Primero se estableció la función de tiempo de arribo. Los tiempos de arribo de las ondas ocurridas por eventos sísmicos se ven afectados por muchos factores. Categóricamente, hay tres principales: estructura y composición de los medios donde se propagan las ondas de estrés, mecanismo fuente y orientación relativa de la fuente y los sensores, y la forma y geometría de la estructura en estudio. Si la posición de los sensores de Emisión Acústica está determinada por X_i $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$, ver figura 1, y la posición de la fuente es X_o (x_0, y_0, z_0) emitida en un tiempo de origen t_0, la distancia de la fuente al sensor puede ser obtenida por

$$D = \sqrt{(x_{obs} - x_0)^2 + (y_{obs} - y_0)^2 + (z_{obs} - z_0)^2} \tag{5}$$

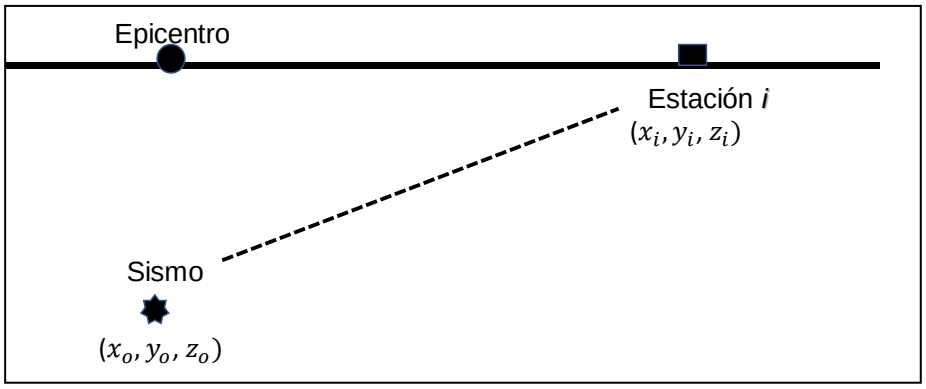


Figura 1. Esquema geométrico de localización de fuente de Emisión Acústica

El tiempo de arribo a partir de la posición de la fuente al sensor X_i esta dado por la ecuación

$$t_i = \frac{1}{V}[(x_{obs} - x_0)^2 + (y_{obs} - y_0)^2 + (z_{obs} - z_0)^2]^{1/2} + t_0 \quad (6)$$

Donde x, y, z son las coordenadas del evento de EA, t es el tiempo de origen del evento de EA, x_i, y_i, z_i son las coordenadas del sensor i y V es la velocidad de la onda P en el medio.

En el segundo paso en la implementación fue preparar los datos. Una vez que las funciones de arribo son establecidas, el siguiente paso es preparar los datos. Es conocida a partir de la ecuación (2) que hay cuatro datos que hay que preparar: la solución de prueba, los tiempos de arribo observados, los tiempos de arribo calculados y las derivadas parciales.

Finalmente, en la implementación del algoritmo se solucionó el anterior sistema de ecuaciones mínimos cuadrados. La solución de mínimos cuadrados para un sistema inconsistente está dada por la ecuación (3)

$$\delta m = (GG^T)^{-1} G^T \Delta d$$

Por lo general, el tamaño del vector de corrección, δm, disminuirá rápidamente y alcanzará una precisión prescrita en unas pocas iteraciones. Sin embargo, es posible que δm no converja: puede oscilar o incluso aumentar más allá sin controlar. El problema de la divergencia es un signo de la inestabilidad de la matemática asociada. sistema, que generalmente es el resultado de una geometría de matriz deficiente

RESULTADOS

Montaje experimental

El algoritmo de localización fue testeado en un cubo de hormigón con dimensiones de 30 cm x 30 cm x 30 cm como se muestra en la figura 2. Cuatro (4) sensores fueron acondicionados para el ensayo, y sus coordenadas se muestran en la tabla 1.

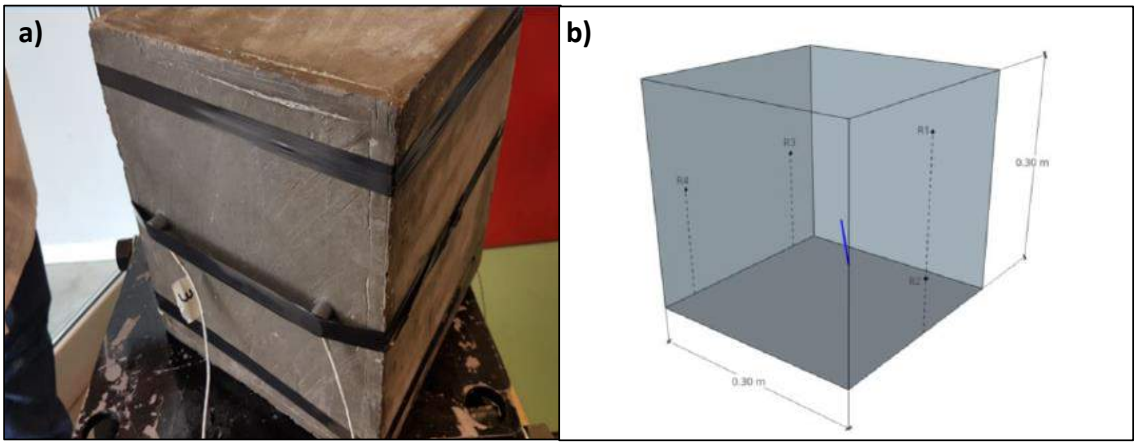


Figura 2. a) localización de los sensores en cubo de hormigón y b) Coordenadas de posición de sensores de EA.

Las coordenadas de los sensores de EA se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de localización de los receptores de emisión acústica

Descripción	x [cm]	y[cm]	z[cm]
Receptor 1 (R1)	15	0	25
Receptor 2 (R2)	15	0	5
Receptor 3 (R3)	25	30	15
Receptor 4 (R4)	5	30	15

Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40db. Las señales fueron convertidas a a través de dos (2) placas de adquisición PCI-2 de PAC y filtradas por un filtro pasa baja de 20Khz y un filtro pasa alta de 400kHz. Una frecuencia de 2000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 45 dB basado en el ruido ambiental, los demás detalles se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2. Standard channel setup definido para el sistema de adquisición de EA.

Sensor	Thr [dB]	Pre Amp [dB]	Lower Freq [kHz]	Upper Freq [kHz]	Sample Rate [MSps]	Pre-Trig	Len [kS]
1	45	40	20	400	2	500.0000	10
2	45	40	20	400	2	500.0000	10
3	45	40	20	400	2	500.0000	10
4	45	40	20	400	2	500.0000	10

Todos los parámetros característicos de la EA fueron registrados en el software AEWIN. Además, siete (7) fuentes de EA fueron generadas en la superficie del bloque mediante la ruptura del lápiz, sus coordenadas se pueden ver en la tabla 3. El tamaño de la mina de lápiz HB es de 0,5 mm y fue rota a 30 ° con respecto a la superficie del hormigón.

Tabla 3. Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Descripción	x [cm]	y[cm]	z[cm]	t[s]
Fuente 1 (D1)	25	30	15	4,2
Fuente 2 (D2)	5	30	15	8,8
Fuente 3 (D3)	25	30	15	51,5
Fuente 4 (D4)	5	30	15	56,6
Fuente 5 (D5)	15	0	25	67,5
Fuente 6 (D6)	15	0	5	73,2
Fuente 7 (D7)	15	0	25	78,3

Tiempos de arribo observados

Antes de localizar una fuente de EA, los tiempos de arribo deben ser determinados. Se hizo una revisión de las formas de ondas para cada los tiempos de las ondas P y S para cada sensor y así verificar que el tiempo de disparo de la onda fuera el correcto. El tiempo correspondiente al primer punto de despegue se determina generalmente como el tiempo de arribo. La figura 3 muestra el principio de selección de los tiempos de arribo.

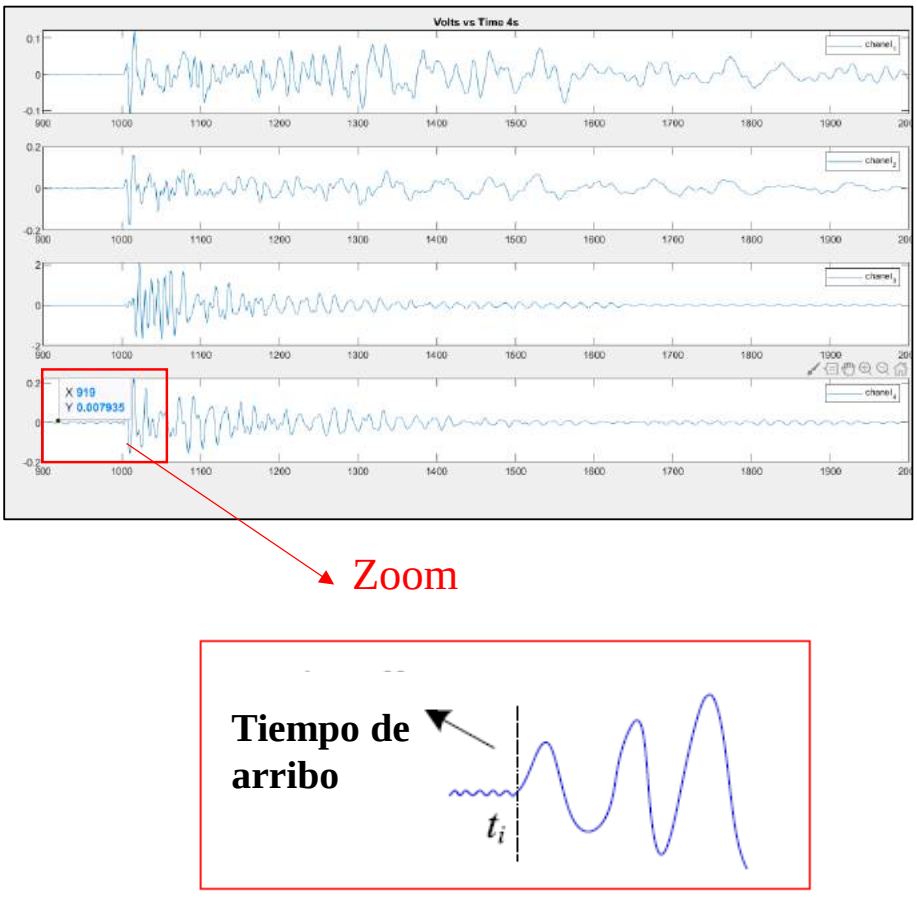


Figura 3. Principio de revisión de formas de ondas en cada sensor de EA.

Finalmente, se asumió una velocidad de propagación de ondas de 4000 m/s para un material tipo hormigón. Este valor fue comprobado asumiendo el tiempo de arribo de un canal a otro. La tabla 4 muestra los resultados de la localización. En la figura 5 se muestran los errores absolutos promedio de las fuentes de EA. La precisión de las soluciones finales se ve principalmente afectada por el punto de partida del algoritmo y el error del registro de los tiempos observados y de la velocidad de propagación en el medio.

Tabla 4. Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Fuente EA No	Localización Real EA (x,y,z) [cm]	Solución Inicial [cm]	Resultados Localización de Geiger	Iter	Error [mm]
1	(25, 30, 15)	(15, 15, 15)	(26, 32,16)	5	(1.0, 2.0,1.0)
2	(5.0, 30, 15)	(5.0, 24, 10)	(2.0, 31,15)	2	(3.0, 1.0,0.0)
3	(25, 30,15)	(20, 25, 15)	(24, 32,15)	2	(1.0, 2.0,0.0)
4	(5.0, 30, 15)	(10, 25, 15)	(3.0, 31,16)	2	(2.0, 1.0,1.0)
5	(15, 0.0, 25)	(10, 5.0, 20)	(16, -0.02,24)	2	(1.0,2.0,1.0)
6	(15, 0.0, 5.0)	(15, 2.0, 6.0)	(14, -0.02,7.0)	2	(1.0,2.0,2.0)
7	(15, 0.0, 25)	(10,2.0, 20)	(15, -0.02,25)	2	(0.0,2.0,1.0)

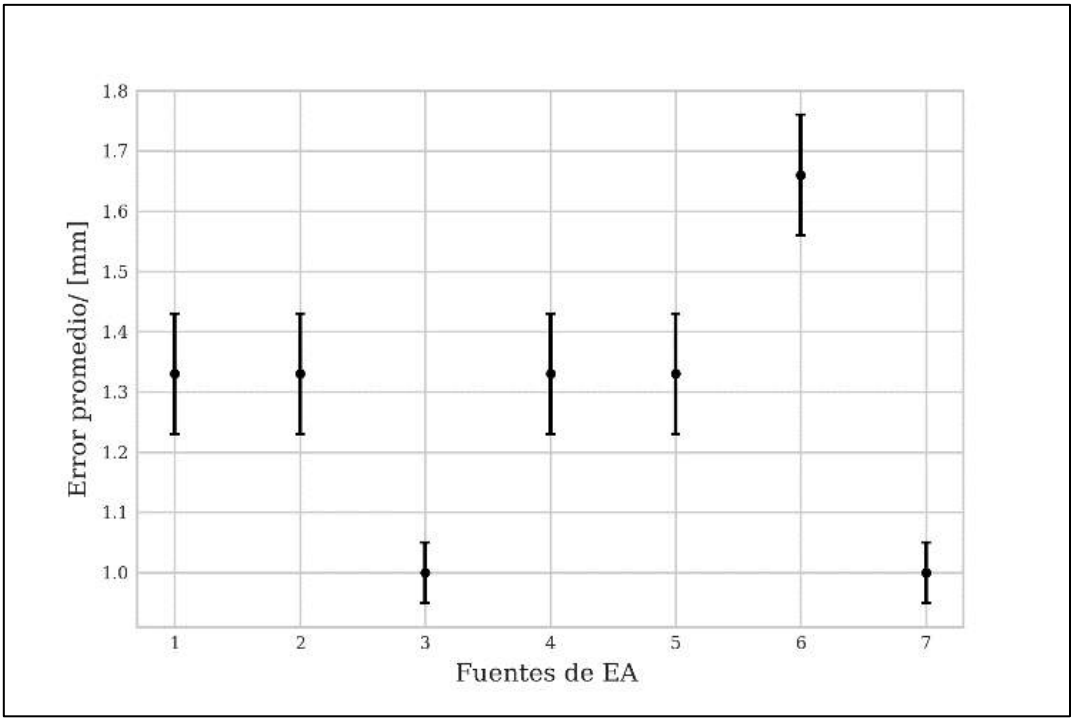


Figura 4. Los errores absolutos promedio de las fuentes de EA.

CONCLUSIONES

El algoritmo de localización, basado en el método de Geiger, se implementó en tres diferentes etapas: establecimiento de funciones de tiempo de arribo, preparación de los datos y linealización del problema. La precisión de las soluciones finales se ve principalmente afectada por tres factores: la solución inicial de partida del algoritmo, la precisión del registro de los tiempos observados y la velocidad del medio. Otro factor importante es la ruta de

propagación de la señal de AE que viaja desde la fuente hasta el sensor, esta puede cambiar con la ubicación de la fuente de AE. Por lo tanto, la velocidad de onda media de estas trayectorias también varía según la ubicación de la fuente.

REFERENCIAS

Guo, Investigating the effect of rock bridge on the stability of locked section slopes by the direct shear test and acoustic emission technique. *Sensors*, Vol 20, pp 638 (2020).

Cai, X . Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: Phenomena and mechanisms. *Appl. Sci*., 9, 4450 (2019).

Zhou, Z.; Cai, X.; Li, X.; Cao, W.; Du, X. Dynamic Response and Energy Evolution of Sandstone Under Coupled Static–Dynamic Compression: Insights from Experimental Study into Deep Rock Engineering Applications. Rock Mech. Rock Eng., 53, 1–27 (2019).

Muzet, A. Environmental noise, sleep and health. Sleep Med. Rev., 11, 135–142 (2007).

Zacarías, F.F.; Molina, R.H.; Ancela, J.L.C.; López, S.L.; Ojembarrena, A.A. Noise exposure in preterm infants treated with respiratory support using neonatal helmets. Acta Acust. United Acust., 99, 590–597 (2013).

Holford, K.M.; Eaton, M.J.; Hensman, J.J.; Pullin, R.; Evans, S.L.; Dervilis, N.;Worden, K. A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview. Prog. Aerosp. Sci. 2017, 90, 1–11.

Qi, L.; Zeng, Z.; Sun, L.; Rui, X.; Fan, F.; Yue, G.; Zhao, Y.; Feng, H. An Impact Location Algorithm for Spacecraft Sti_ened Structure Based on Posterior Possibility Correlation. Sensors, 20, 368 (2020).

Li, L.; Yang, K.; Bian, X.; Liu, Q.; Yang, Y.; Ma, F. A Gas Leakage Localization Method Based on a Virtual Ultrasonic Sensor Array. Sensors, 19, 3152 (2019).

Fredianelli, L.; Nastasi, M.; Bernardini, M.; Fidecaro, F.; Licitra, G. Pass-by Characterization of Noise Emitted by Different Categories of Seagoing Ships in Ports. Sustainability, 12, 1740 (2020).

Bolognese, M.; Fidecaro, F.; Palazzuoli, D.; Licitra, G. Port Noise and Complaints in the North Tyrrhenian Sea and Framework for Remediation. Environments, 7, 17 (2020).

Geiger L., "Herdbestimmung bei erdbeben aus denankunftszeiten. Nachrichten von der gesellschaft der wissenschaften zu G¨ottingen," Mathematisch-Physikalische Klasse, vol. 4, pp. 331–349 (1910).

Geiger L., "Probability method for the determination of earthquake epicenters form the arrival time only," Bulletin of Saint Louis University, vol. 8, pp. 60–71, (1912).

Mowrey G. L., "Computer processing and analysis of microsismic data," in Proceedings of the 1st Conference on AEIMA in Geology Structures and Materials, Pennsylvania State University, PA, USA (1975).

Dong L., "Some Developments and New Insights for Microseismic/Acoustic Emission Source Localization", Shock and Vibration, vol. 2019, pp 15 (2019).

EFFUSION RATE DETERMINATION THROUGH ANALYSIS OF THE LAVA FLOW DYNAMICS: THE CASE OF TILOCÁLAR LAVA FLOWS, NORTHERN CHILE

Vilches M.[a,b], Ureta G.[b,c], Aguilera M.[a,b] y Aguilera F.[a,b,c]

[a] *Departamento en Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, CHILE*
[b] *Núcleo de Investigación en Riesgo Volcánico - CKELAR Volcanes, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, CHILE*
[c] *Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, CHILE*

e-mail: mvilchesapablaza@gmail.com

ABSTRACT

The Tilocálar monogenetic volcanic field comprises four volcanic centers located in the south of the Salar de Atacama basin, northern Chile. These monogenetic centers, known as Tilocálar Norte lava flow (TCN), El Maní dome, Tilocálar Sur lava flows (TCS), and Tilocálar Sur maar, are the result of intermediate magmas raised to the surface during local transtensive regime, within a compressional setting. TCN lava flow reaches a maximum distance of 3.9 km towards the north and 1.2 km towards the southwest of their vent. This lava flow covers an area of 3.31 km^2, displays a Dense Rock Equivalent (DRE) volume of 8.73×10^7 m^3. TCS is composed of eight lava flows, reaching up to 1.8 km length to the northwest and 1.4 km length to the east of their emission centers. These lava flows cover an area of 3.78 km^2 with 9.15×10^7 m^3 DRE volume. The TCN and TCS lava flows show a wide of volcanic structures such as levees, lobes, channels, and ogives, which were identified through slope maps and fieldwork. Through the Q-LAVHA tool (Q-GIS software extension), in this work was modeled a set of simulations to determinate the emplacement time and effusion rate of these lava flows. The parameter required for Q-LAVHA corresponds to the FLOWGO parameters and the pre-eruptive surface. The simulation results indicate that the eruptive events were prolonged overtime for more than 6.80 days with an effusion rate of 148 m^3/s for TCN, and 6.01 days with an effusion rate of 176 m^3/s for TCS. This knowledge would permit to have an approximation of the volcanic hazard associated with lava flows at the south of the Salar de Atacama basin, facilitating the mitigation of volcanic hazard in case of future eruptions near of Tilomonte and Peine villages, and water wells of Zaldivar and Escondida mines.

Keywords: Monogenetic volcanism, small-volume volcanoes, Altiplano-Puna, Salar de Atacama, Q-LAVHA

INTRODUCTION

The dynamics of lava flows can be determined by direct measurements in active lava flows, which depend on factors such as temperature, effusion rate, and pre-eruptive surface (Swanson, 1973; Rowland and Walker, 1990; Giordano et al., 2008; Harris and Rowland, 2009). In consolidated lava flows, the dynamics can be obtained through the analysis of the geomorphology or lava morphotypes (e.g. Murcia et al., 2014), pre-eruptive surface modeling (e.g. Kereszturi et al., 2016), calculation of the initial viscosity of the lava (e.g. Giordano et al., 2008; Herzberg and Asimow, 2015), and rheological models (e.g. FLOWGO; Harris and Rowland, 2001; Mossoux et al., 2016). The effusion rate is one of the necessary parameters for the modeling of future eruptions (Cordonnier et al., 2016), which can be measured during the emplacement of active lava flows (e.g. Coltelli et al., 2007; Coppola and Cigolini, 2013). To model future eruptions of lava flows, there are several software or extension as Q-LavHA (Mossoux et al., 2016), MAGFLOW (Vicari et al., 2007) and SCIARA (Crisci et al., 1986), being Q-LavHa the most representative due to the use of the model FLOWGO (Harris and Rowland, 2001), since this model has the benefit a fast computation, determines emplacement, crystallization in the heat budget and rheological dependency on crystal and temperature.

Lava flows have been defined as monogenetic volcanoes that represent the most abundant type of volcanism on the Earth (Walker, 2000). Monogenetic volcanism generates volcanoes of small volume < 1 km^3 with a duration that can vary from hours to hundreds of years (Kereszturi and Nemeth, 2012; Németh and Kereszturi, 2015).

The Tilocálar monogenetic volcanic field comprises four volcanic centers located south of the Salar de Atacama basin, northern Chile (see Fig. 1). These monogenetic centers, known as Tilocálar Norte lava flow (TCN), El Maní dome, Tilocálar Sur lava flows (TCS), and Tilocálar Sur maar, are the result of intermediate magmas raised to the surface during a local transtensive regime (Ureta et al., under review in JVGR) within a compressional setting (González et al., 2009). TCN is characterized by andesitic lava flow; El Maní is a small dome (covering 750 m^2 area and consisting of 1.06×10^3 m^3 DRE volume) that presents mingled composition (dacite and rhyolite); TCS is composed by units of pyroclastic deposit and basaltic andesite to andesitic lava flows; and TCS maar is an elliptical crater in map view (363 m across east-west and 288 m across north-south) of andesite composition (Ureta et al., under review in JVGR).

Although the effusion rate is a parameter estimated during active events of lava flows, in this work, the effusion rate of the solidified lava flows of the TCN lava flow and TCS lava flows were estimated. This estimation was carried out through the six parameters as the vent location, the channel ratio, the maximum extent of the lava flow, initial mass fraction of phenocrysts, the initial viscosity of the lava, and the pre-eruptive surface. Considering these parameters and using the Q-LavHA extension, it was possible to determine the effusion rates involved in the emplacement of these lava flows. This information contributes to simulating similar eruption scenarios, understanding the behavior and duration that future volcanic emissions would have. Besides, this favors the assessment of volcanic hazard and facilitates the mitigation of future eruptions.

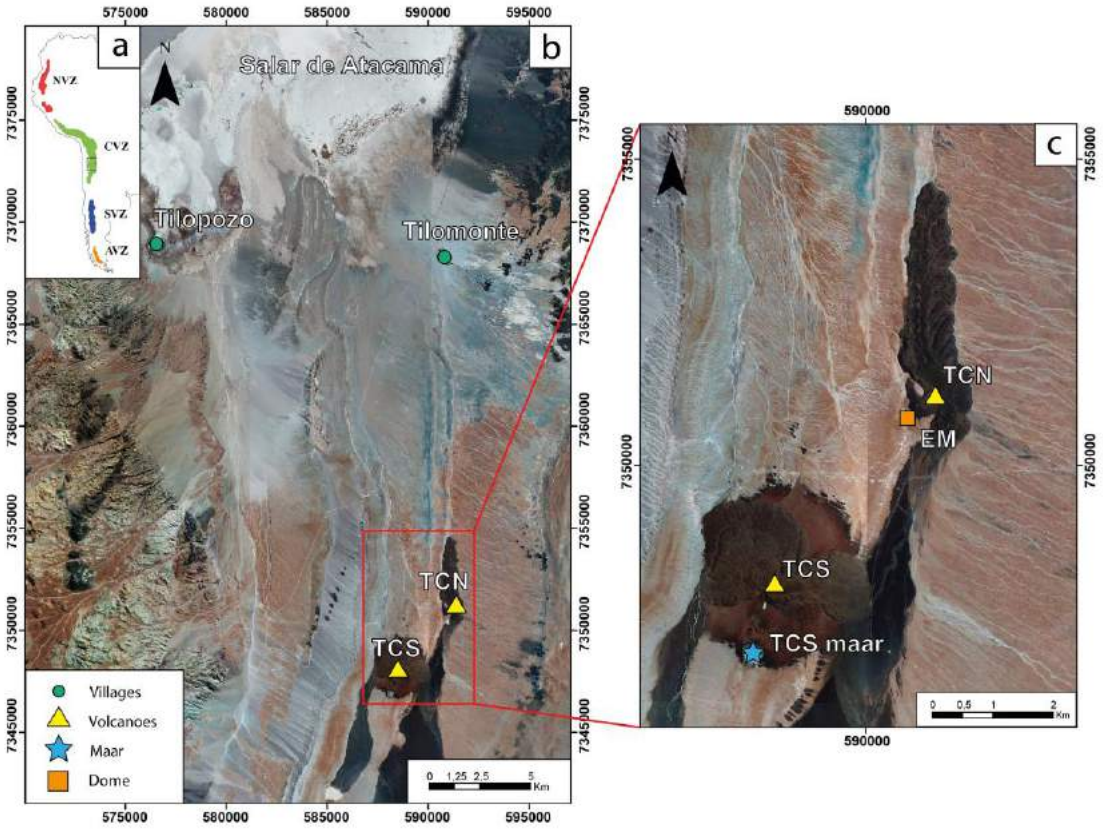


Figure 1. a) Location map of the Volcanic Zones of the Andes. NVZ: Northern Volcanic Zone; CVZ: Central Volcanic Zone; SVZ: South Volcanic Zone; AVZ: Austral Volcanic Zone (Thorpe and Francis, 1979). b) Satellite image of the southern area of the Salar de Atacama basin taken from Google Earth. The analyzed lava flows are observed in the red box. c) Location map of the Tilocálar volcanoes. TCN: Tilocálar Norte lava flow; EM: El Maní dome; TCS: Tilocálar Sur lava flows; TCS maar: Tilocálar Sur maar.

METHODOLOGY

Modeling of the pre-eruptive surface

The pre-eruptive surface of the Tilocálar volcanoes was modeled (see Fig. 2) using a modified version of the method developed by Kereszturi et al. (2016). The pre-eruptive surface was defined, creating a digitized mesh of points (see Fig. 2a-b) generated using the "Create fishnet" tool from the Arc Toolbox catalog (ArcGIS^{TM} software). Spaced points were generated 1 m apart, and 2 m away from the lava flows. This mesh of points was assigned height values extracted from a TanDEM image of 12 m resolution (Krieger et al., 2007). The pre-eruptive morphology (see Fig. 2c-d) reconstruction was carried out through the Triangulated Irregular Network (TIN) tool, which was generated using Delaunay's criteria in the previously mentioned mesh of points (Kereszturi et al., 2016). Subsequently, with this TIN, a Raster image was generated with the "TIN to Raster" tool from the Arc Toolbox catalog (ArcGIS^{TM} software).

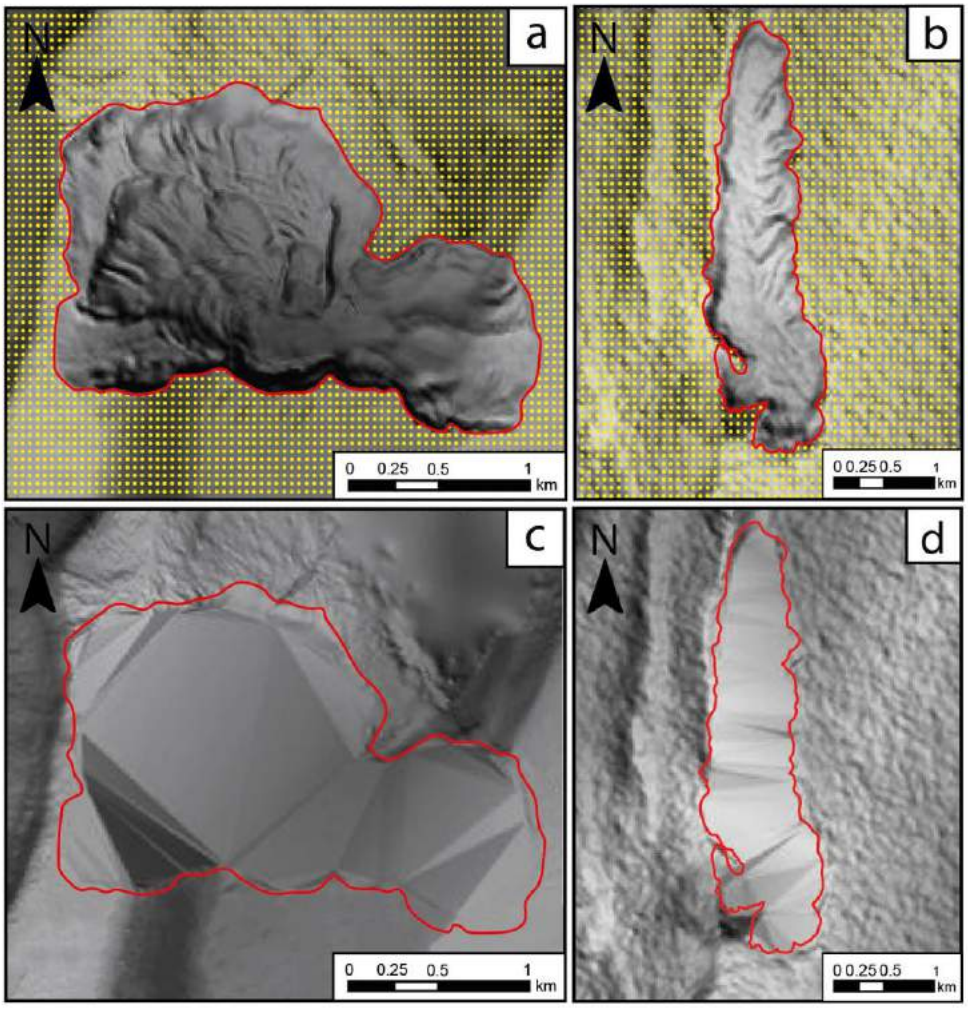


Figure 2. a) Fishnet to generate the pre-eruptive surface of TCS lava flow. b) Fishnet to generate the pre-eruptive surface of TCN lava flow. c) Pre-eruptive surface of TCS. d) Pre-eruptive surface of TCN.

Determination of effusion rate

To determine the lava flow effusion rate of the Tilocálar volcanoes, the Q-LavHA extension was used (Mossoux et al., 2016). It is a free complement of the Q-GIS software, which simulates the probability of flooding lava flows according to vents regularly distributed in a Digital Elevation Model (DEM). Q-LavHA combines existing probabilistic and deterministic models, improving the probability calculation of spatial propagation and the final length of the lava flows (Mossoux et al., 2016). The Q-LavHA extension works from seven main parameters such as the vent location, the channel ratio, the maximum extent of the lava flow, the initial mass fraction of phenocrysts, the initial viscosity of lava, the effusion rate, and advanced parameters determined by FLOWGO (e.g. Harris and Rowland, 2001; Mossoux et al., 2016). The climatic parameters as convection, radiation, and conduction were obtained from the meteorological information website (https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/negrillar_chile_3890903). The other parameters were obtained from Ureta et al. (under review in JVGR).

The channel ratio consists of the relationship between the lava flow channel's width and thickness, determined by the HEC - RAS software (Brunner, 2002). Although this software is typically used for river systems, it is also suitable to be used in lava flow systems (e.g. Dietterich and Cashman, 2014). Using ArcGIS^{TM} software and a series of shapefiles (e.g. Centerline, Bank Lines, Flowpath, XS Cut Lines) generated through the HEC - GeoRAS extension (Brunner, 2016) were created different cross-sections. Using the HEC - RAS on the current surface and the pre-eruptive surface, the channel width, and thickness values were determined according to the difference between these measurements.

To determine the effusion rate, it was evaluated as an unknown parameter to be developed and to confirm if the modeling result generates the same lava flow that is currently formed. Therefore, it must have another known parameter, which corresponds to the pre-eruptive surface of the modeled area. The unknown parameter (the effusion rate) was found with the entry of random values of effusion rates until to find the correct value that generates the most similar lava flow with respect to the current one.

The limits of these random values were extrapolated from known volcanoes with characteristics similar to those observed in the field, such as lava flow type a'a and block, of andesitic and basaltic composition and similar extensions. For this, the lava flows of Etna 2001 (Coltelli et al., 2007; Vicari et al., 2011) , Krafla 1984 AD (Rossi, 1997) and Nyamuragira 2006 (Smets et al., 2015) were considered.

This variation started from the value 155 m^3/s, adding or decreasing each simulation a value of 1 m^3/s until the appropriate value was found.

Fitness index

The physical fitness index (AF) compares the simulated lava flow with the real lava flow (Favalli et al., 2009). "$AF_{true\ positive}$" (see Eq. 1) corresponds to the overlapping area, "As" to the area of the simulated flow, and "Ar" to the area of the real lava flow. If the AF is near 1, the overlapping is more important, and the lava flow simulated resembles the actual lava flow (Mossoux et al., 2016). It is important to assess whether the mismatch between the simulated flow and the real lava flow is mainly due to an overestimation ($AF_{false\ positive}$; see Eq. 2) or an underestimation ($AF_{false\ negative}$; see Eq. 3)

$$AF_{true\ positive} = \frac{As \cap Ar}{As \cup Ar} \quad (1)$$

$$AF_{false\ positive} = \frac{As - (As \cap Ar)}{As \cup Ar} \quad (2)$$

$$AF_{false\ negative} = \frac{Ar - (As \cap Ar)}{As \cup Ar} \quad (3)$$

RESULTS

Q-LavHA parameters

The Q-LavHA parameters are differentiated into two types. On one hand, those that correspond to basic parameters for each lava flow simulation and differ from each other (Table I). On the other hand, those that are advanced parameters FLOWGO, such as environmental measurements, thermal parameters, crystal parameters, radiation parameters and conduction parameters (Table II).

The basic parameters for the simulation of lava flows that are subdivided into:

- The location vent of the TCN lava flow (V1) is at the UTM coordinates 7,351,004.93 mN - 590,881.97 mE. While the location vent of the TCS lava flows (V2) is at the UTM coordinates 7,347,928.71 mN – 588,503.57 mE.

- The channel ratio was obtained by the relationship between the width and the depth of the channel, which corresponds to 5.35 for TCN lava flow and 7.80 for TCS lava flows.

- The maximum extent of lava flows corresponds to 3,841 m for TCN and 1,714 m for TCS.

- The initial mass fraction of phenocrysts, represented by the percentage ratio of phenocrysts present in the samples of each lava flow, indicates a fraction of 0.30 for TCN and 0.45 for TCS.

- The initial viscosity of the lava flows calculated by the grdViscosity calculator (Giordano et al., 2008), determining a viscosity of 5,370 Pa*s for TCN, and 1,819 Pa*s for TCS.

Table I. General parameters of the FLOWGO model, specific for the Q-LavHA extension for the simulation of each lava flow and determination of effusion rates.

	Parameters	Unit	TCN	TCS
General Parameters	Vent	m (UTM)	(590,881.97 , 7,351,004.93)	(588,503.57 , 7,347,928.71)
	Lenght	m	3841	1714
	Hc	m	4.5	4.5
	Hp	m	68	68
	Lava initial viscosity	Pa*s	5370.3	1819.7
	Initial phenocryst mass fraction	-	0.30	0.45
	Channel ratio	-	5.35	7.80
	T(eruption)	°C	1031.48	1073.85

Hc: represents the thickness of the lava; Hp: thickness of lava simulated in a depression and its ability to overflow it

Table II. Advanced parameters of the FLOWGO model in the Q-LavHA extension for the simulation of lava flows and determination of effusion rates.

	Parameters	Unit	Lava Flows
Thermal Parameters	T(crust)	°C	500
	Offset	°C	160
	d	-	-0.16
Velocity Constant	Gravity	m/s^2	9.81
Crystal Parameters	Growth rate	-	0.0096
	L	J/kg	350000
	R	-	1.51
Viscosity and Elasticity	a	1/K	0.04
	b	Pa	0.01
	c	1/K	0.08
Lava density and vesicularity	DRE density	kg/m^3	2700
	Vesicularity	-	0.12
Radiation parameters	sbc	W/m^2*K^4	5.67e-08
	e	-	0.95
Convection parameters	Wind speed	m/s	20
	Ch	-	0.0036
	T (air)	°C	9
	Density (air)	kg/m^3	0.4412
	Specific heat capacity (air)	J/kg*K	1099
Conduction parameters	Thickness of lava crust	%	19
	T (base of lava crust)	°C	700
	Lava termal conductivity	W/m*K	2.5
	Number of iterations	-	5000

d: constant; L: latent heat of crystallization; R: inverse of the maximum solid fraction; a: Dragoni constant; b: Dragoni constant; c: Dragoni constant; sbc: Stefan-Boltzmann constant; e: emissivity of the basalt; Ch: related to wind speed friction

Effusion rate

The calculated effusion rates and emplacement times are 148 m^3/s in 6.80 days for TCN and 176 m^3/s in 6.01 days for TCS.

DISCUSSION

Effusion rate and validation

The Q-LavHA extension in the Q-GIS software was used for simulations of the Tilocálar volcanoes (see Fig. 3). This system bases its operation on a complex interaction between the effusion rate, pre-eruptive surface, lava viscosity, cooling processes, morphology, and propagation dynamics (Harris and Rowland, 2001; Proietti et al., 2009; Mossoux et al., 2016). Among the parameters used for modeling lava flows, the effusion rate is the most important parameter.

The pre-eruptive surface has an extremely important role in the modeling of lava flows since its slope interacts with the channel ratio, directly influencing the one-dimensional model generated by the Q-LavHA extension. In this way, to create a pre-eruptive surface without the appropriate parameters causes the erroneous accumulation of lava and rheology that does not correspond to the real characteristics. Lava flow simulations were generated with an overestimation of 0.10 for TCN and 0.19 for TCS; and an underestimation of 0.17 for TCN and TCS (Table III). An overestimation is observed in the simulated TCS flows due to the pre-eruptive surface generated and the inclination of the Tucúcaro Ignimbrite fold's basement product. This would produce the accumulation of lava in the southern zone, generating the absence of lava flows in the northern zone in the simulations in TCS. Although in TCN there is no significant overestimation, an underestimation is observed because the Ignimbrite Tucúcaro is folded in this sector, which makes a tilted pre-eruptive surface that favors the accumulation of lava in the western of the TCN, being emplacement in less space than expected.

Table III. Comparison of the simulated area with the area of the real lava flows under study.

	Unit	TCN	TCS
Real lava flow	km^2	3.31	3.70
Simulated area	km^2	3.06	3.80
Intersection area	km^2	2.69	2.95
Union area	km^2	3.68	4.56
Overlapping/ true positive	-	0.73	0.65
Overestimation/ false positive	-	0.10	0.19
Underestimation/ false negative	-	0.17	0.17

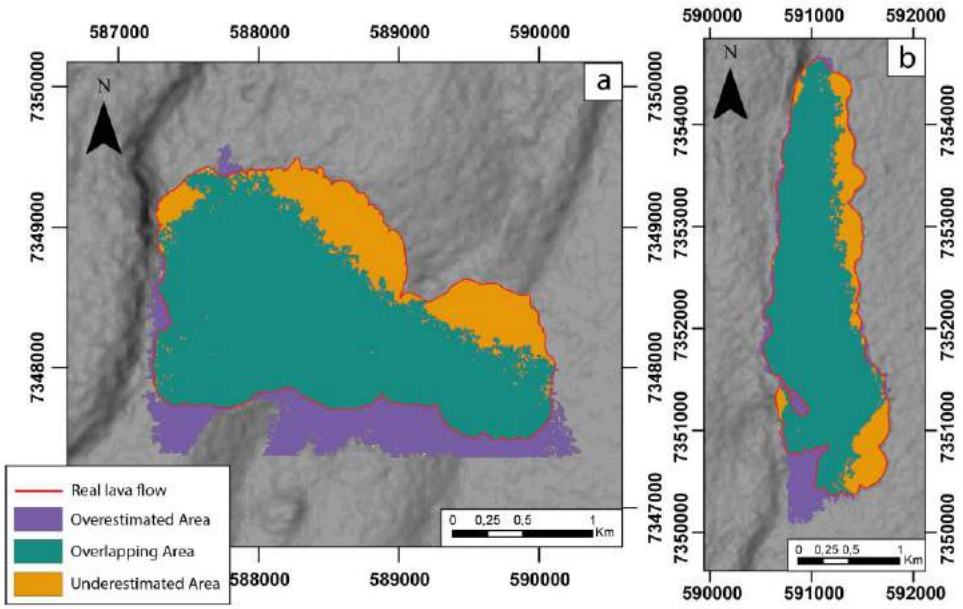


Figure 3. Simulation of the lava flows corresponding to the effusion rates with the best fit, in which the simulated area is compared with the area of TCS (a) and TCN (b).

Hazard

According to Dunkley and Young (2000), volcanic hazard assessment is generally based on the premise that future volcano activity will be similar to past activity in terms of eruption style, size, and frequency. By performing multiple lava flow modeling, it was determined that the higher the effusion rate, larger lava flows are generated, being this in agreement with that was proposed by Walker (1973).

The results obtained indicate that with an effusion rate of 148 m^3/s and 176 m^3/s for TCN and TCS lava flows, respectively. These eruptions could be maintained between 6 to 7 days, reaching maximum extensions of 3,841 m and 1,714 m, with a DRE volume of 8.73×10^7 m^3 and 9.15×10^7 m^3 (Ureta et al., under review in JVGR) for TCN and TCS flows, respectively.

The Q-LavHA extension offers a consistent data iteration for modeling and determining effusion rates in the Tilocálar volcanoes. It also allows an evaluation of the volcanic hazard and facilitates the mitigation of volcanic risk in future eruptions near localities as Tilomonte and Peine, or close to the Zaldivar and Escondida mines.

CONCLUSION

The determination of these lava flow effusion rates provides fundamental information to evaluating the volcanic hazard associated with the lava flows located in the south of the Salar de Atacama basin. These results will facilitate the mitigation of the volcanic danger in the event of future eruptions near the local communities in the south of the Salar de Atacama, localities of Tilomonte and Peine, the Zaldívar and Escondida mines, the Socompa border crossing (Chile-Argentina), and the lines of power lines connecting Chile and Argentina.

Based on the risk assessment context, it was considered more appropriate to overestimate the area affected by the lava flow or “flooded area”, than to underestimate it. For the lava flows analyzed, AF values of 0.73 for TCN and 0.65 for TCS were obtained (Table 3), which are very close to 1; therefore, they present an optimal areal overlap.

REFERENCES

Brunner, G.W., Hec-ras (river analysis system), North American Water and Environment Congress & Destructive Water. ASCE, pp. 3782-3787. (2002).

Brunner, G.W., HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual, Version 5.0. US Army Corps of Engineers, Institute of Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. (2016).

Coltelli, M., Proietti, C., Branca, S., Marsella, M., Andronico, D. and Lodato, L., Analysis of the 2001 lava flow eruption of Mt. Etna from three-dimensional mapping. 112(F2). (2007).

Coppola, D. and Cigolini, C., Thermal regimes and effusive trends at Nyamuragira volcano (DRC) from MODIS infrared data. Bulletin of volcanology, 75(8): 744. (2013).

Cordonnier, B., Lev, E. and Garel, F., Benchmarking lava-flow models. Geological Society, London, Special Publications, 426(1): 425-445. (2016).
Crisci, G., Gregorio, D., Pindaro, O. and Ranieri, G., Lava Flow Simulation Bv A Discrete Cellular Model: First Implementation. International Journal of Modelling Simulation, 6(4): 137-140. (1986).
Dietterich, H.R. and Cashman, K.V., Channel networks within lava flows: Formation, evolution, and implications for flow behavior. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(8): 1704-1724. (2014).
Dunkley, P. and Young, S., Volcanic hazard mapping for development planning. (2000).
Favalli, M., Mazzarini, F., Pareschi, M.T. and Boschi, E., Topographic control on lava flow paths at Mount Etna, Italy: implications for hazard assessment. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 114(F1). (2009).
Giordano, D., Russell, J. and Dingwell, D., Viscosity of Magmatic Liquids: A Model. Earth and Planetary Science Letters, 271: 123-134. (2008).
González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E. and Shyu, J., Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23 S–24 S). Tectonics 28, TC6003. (2009).
Harris, A. and Rowland, S., Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss: a review. Studies in volcanology: the legacy of George Walker. Special Publications of IAVCEI, 2: 33-51. (2009).
Harris, A.J. and Rowland, S., FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel. Bulletin of Volcanology, 63(1): 20-44. (2001).
Herzberg, C. and Asimow, P., PRIMELT 3 MEGA. XLSM software for primary magma calculation: peridotite primary magma MgO contents from the liquidus to the solidus. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 16(2): 563-578. (2015).
Kereszturi, G. and Nemeth, K., Structural and morphometric irregularities of eroded Pliocene scoria cones at the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Hungary. Geomorphology, 136: 45-58. (2012).
Kereszturi, G., Nemeth, K., Moufti, M.R., Cappello, A., Murcia, H., Ganci, G., Negro, C., Procter, J. and Zahran, H., Emplacement conditions of the 1256 AD Al-Madinah lava flow field in Harrat Rahat, Kingdom of Saudi Arabia – Insights from surface morphology and lava flow simulations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 309: 14–30. (2016).
Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M. and Zink, M., TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. Transactions on Geoscience Remote Sensing, 45(11): 3317-3341. (2007).
Mossoux, S., Mathijs, S., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F. and Kervyn, M., Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. Computers & Geosciences, 97. (2016).
Murcia, H., Németh, K., Moufti, M., Lindsay, J., El-Masry, N., Cronin, S., Qaddah, A. and Smith, I., Late Holocene lava flow morphotypes of northern Harrat Rahat, Kingdom of Saudi Arabia: implications for the description of continental lava fields. Journal of Asian Earth Sciences, 84: 131-145. (2014).
Németh, K. and Kereszturi, G., Monogenetic volcanism: personal views and discussion. International Journal of Earth Sciences, 104(8): 2131-2146. (2015).
Proietti, C., Coltelli, M., Marsella, M. and Fujita, E., A quantitative approach for evaluating lava flow simulation reliability: LavaSIM code applied to the 2001 Etna eruption. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10(9). (2009).
Rossi, M.J., Morphology of the 1984 open-channel lava flow at Krafla volcano, northern Iceland. Geomorphology, 20(1-2): 95-112. (1997).
Rowland, S. and Walker, G., Pahoehoe and aa in Hawaii: volumetric flow rate controls the lava structure. Bulletin of Volcanology, 52: 615-628. (1990).

Smets, B., Kervyn, M., d'Oreye, N. and Kervyn, F.J.E.-S.R., Spatio-temporal dynamics of eruptions in a youthful extensional setting: Insights from Nyamulagira Volcano (DR Congo), in the western branch of the East African Rift. 150: 305-328. (2015).

Swanson, D.A., Pahoehoe Flows from the 1969–1971 Mauna Ulu Eruption, Kilauea Volcano, Hawaii. GSA Bulletin, 84(2): 615-626. (1973).

Thorpe, R. and Francis, P.J.T., Variations in Andean andesite compositions and their petrogenetic significance. 57(1): 53-70. (1979).

Ureta, G., Németh, K., Aguilera, F., Kósik, S., González, C., González, R., Menzies, A. and Zimmer, M., A dominantly magmatic explosive/effusive to phreatomagmatic embryonic small-volume (monogenetic) volcanic system in a compressional setting: Tilocálar volcanoes, northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research. (under review in JVGR).

Vicari, A., Alexis, H., Del Negro, C., Coltelli, M., Marsella, M., Proietti, C.J.E.M. and Software, Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a cellular automata approach. 22(10): 1465-1471. (2007).

Vicari, A., Ganci, G., Behncke, B., Cappello, A., Neri, M. and Del Negro, C.J.G.R.L., Near-real-time forecasting of lava flow hazards during the 12–13 January 2011 Etna eruption. 38(13). (2011).

Walker, G.P., Basaltic volcanoes and volcanic systems. Encyclopedia of volcanoes: 283-289. (2000).

Walker, G.P.L., Mount Etna and the 1971 eruption-Lengths of lava flows. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical Physical Sciences, 274(1238): 107-118. (1973).

CARACTERIZACIÓN DE LA COLONIZACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES (hongos Glomeromycota) A PARTIR DE RIZÓSFERAS DE PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) DE LA HACIENDA COCOLLAR, EDO. MONAGAS, VENEZUELA

Villalba L.[a]; Toro M.[a]; López-Hernández D.[a] y Cabrera R.[b]

[a] *Laboratorio de Ecología de Agroecosistemas, Centro de Ecología Aplicada, Instituto de Zoología y Ecología Tropical (IZET), Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. VENEZUELA.*
[b] *Hacienda Cocollar, estado Monagas. VENEZUELA.*

e.mail: luisa.t.villalba@ucv.ve

RESUMEN

La fertilidad de los suelos está relacionada con la presencia de microorganismos benéficos para el crecimiento de las plantas, tales como las asociaciones simbióticas de hongos de micorrizas arbusculares (HMA) con las raíces. Muchos de estos microorganismos están naturalmente presentes en el suelo, pero en ocasiones cuando sus niveles sean deficientes, se pueden incrementar sus poblaciones a través de inoculaciones, mejorando su abundancia y actividad. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la colonización de HMA (hongos Glomeromycota) en distintos lotes de plantaciones de café (Coffea arabica L.*) de la Hacienda Cocollar, a fin de seleccionar el mejor lote para producir un inóculo de especies nativas de HMA. Se seleccionaron siete lotes de café con plantas adultas, sin aplicación de biocidas por más de cinco años; de cada lote, se tomó una muestra compuesta de cinco rizósferas, se les determinó el contenido de esporas por 100 g de suelo, % colonización de raíces por HMA y contenido de nemátodos adultos por 100 g de suelo; también se cuantificó a los principales morfotipos de HMA presentes en el lote seleccionado. De los lotes analizados, las plantas con mejor colonización de HMA, pertenecieron al lote la Cabellera: 139 esporas/100 g de suelo, 3 nemátodos/100 g de suelo, 53% de colonización de HMA en las raíces y presentó 6 morfotipos de micorrizas; este lote se localiza a mayor altura (1.323 msnm) y ha sido el menos intervenido. Se recomendó utilizar las muestras rizosféricas de las plantas de café, del lote la Cabellera, como base para preparar el inóculo de HMA nativas, el cual fue realizado en la Hacienda Cocollar, al mezclarlo con arena en una proporción 50:50 y se sembró con maíz (Zea mayz) como cultivo trampa; la aplicación de este inóculo en vivero reportó plantas con mayor desarrollo radicular.*

Palabras clave: Fertilidad del suelo, microorganismos beneficiosos, rizósfera de café, micorrizas arbusculares, inóculo nativo.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema vivo y su fertilidad es la clave de la productividad agrícola; el mantenimiento de la fertilidad es el primer paso en cualquier sistema agrícola. La plétora de microorganismos inherente a cualquier sistema del suelo asegura que el ciclo de nutrientes está en su lugar y el sustrato complejo se descompone en partículas diminutas que pueden ser fácilmente asimiladas por el sistema radicular de la planta. Por lo tanto, los agricultores deben mantener la fertilidad inherente del suelo reemplazando los nutrientes eliminados por los cultivos o el pastoreo del ganado,

mediante el uso de abonos verdes, estiércol animal (crudo o compostado) y otros fertilizantes naturales (FAO, 2015).

El concepto de fertilidad del suelo, no solamente se debe referir al contenido de nutrientes, ya que el mejorar la estructura y capacidad de retención de nutrientes, también contribuye con la fertilidad; en este sentido, la FAO (2002) considera que la mejor respuesta al uso de fertilizantes se obtiene si el suelo tiene un nivel elevado de fertilidad; es decir, no solo el contenido sino la disponibilidad de los nutrientes necesarios para satisfacer los requerimientos de los cultivos y un suelo sano (libre de patógenos y de condiciones que limiten el buen desarrollo de las plantas).

Por otra parte, la sostenibilidad agrícola requiere, junto con una gestión eficaz del agua y de los cultivos, el uso y manejo óptimos de la fertilidad y de las propiedades físicas del suelo. Esto amerita la adopción de prácticas de manejo que mejoren la actividad biológica del suelo y acumule productividad y salud a largo plazo. Las principales prácticas para mejorar la fertilidad del suelo incluyen el uso de fertilizantes orgánicos como: A. Compost y vermicompost; B. Abonos verdes; C. Estiércol animal; D. Fertilizantes microbianos; y E. Abonos minerales. (FAO, 2015).

En este sentido, la fertilidad de los suelos también está relacionada con la presencia de organismos vivos en el mismo; de acuerdo a Paul (2015), la promoción de microorganismos benéficos para el crecimiento de las plantas puede ser a través de la creación de asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, producción de fitohormonas, inducción de resistencia sistémica, supresión de patógenos, producción de antibióticos y reducción de toxicidad por metales pesados. Muchos de estos microorganismos están naturalmente presentes en el suelo, pero en algunas ocasiones en que sean deficientes, puede ser necesario que se incrementen sus poblaciones al modificar las condiciones del ambiente del suelo, o a través de inoculaciones, mejorando su abundancia y actividad.

Según Puente y col. (2009), los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV), conocidos hoy como PGPM (Plant Growth Promoting Microorganisms), se definen como microorganismos habitantes de la rizósfera que estimulan significativamente el crecimiento de las plantas. Los mecanismos por los cuales los MPCV ejercen efectos positivos sobre las plantas son numerosos, entre ellos se pueden mencionar la fijación de N_2 –Fijación Biológica de Nitrógeno, FBN- (*Azospirillum*), la capacidad de producir ácidos orgánicos (oxálico, fumárico, cítrico) y fosfatasas facilitando la solubilidad del P y otros nutrientes.

La inoculación de micorrizas arbusculares nativas, ha reportado buenos resultados y proporcionan varios beneficios a las plantas de café, al aumentar el poder competitivo de la cosecha contra malezas e incrementar el crecimiento, acumulación de materia seca y contenido de nutrientes en las hojas de las plántulas de café. De allí que los HMA podrían ser importantes en la forestación y ayudar a promover las actividades de producción de café, ofreciendo una alternativa al costoso uso de fertilizantes químicos y como métodos de gestión que aprovechen la dinámica de los sistemas naturales que potencialmente podrían preservar y mejorar la producción de café (Chanie y Assefa, 2013).

El cultivo de café orgánico.

En América Latina, el café es tradicionalmente producido bajo un dosel denso y diverso de árboles de sombra; la diversidad estructural y florística contenida allí, alberga una gran biodiversidad de organismos asociados. La tendencia reciente de reducir la cobertura de sombra para aumentar la producción, plantea inquietudes sobre la posible pérdida de biodiversidad. Esta preocupación ha dado lugar a una variedad de programas de conservación, incluida la certificación del café de sombra, una estrategia de conservación basada en el mercado. Programas de certificación de café de sombra ofrecen la oportunidad de vincular los objetivos ambientales y económicos (Perfecto y col. 2005).

Desde el punto de vista de su importancia ecológica, las zonas cafetaleras juegan un rol significativo en la conservación del ambiente y recursos naturales, al proteger los suelos en pendiente y contribuir con la sustentabilidad de la biodiversidad y los cuerpos de agua (Berlingeri y col., 2007).

Según García (1988), las plantaciones cafetaleras de Venezuela están ubicadas a lo largo de las áreas montañosas de clima medio, de los distintos ramales de la Cordillera de Los Andes y de la Cordillera de la Costa, hacia el norte de la línea ecuatorial, entre los 7º y 10º de latitud Norte. Muchas nacientes de agua, repartidas en todas estas serranías, dan origen a pequeños afluentes que, a través de cauces de quebradas y riachuelos, alimentan los ríos que abastecen de agua las poblaciones y cultivos de las zonas más bajas. Por ello se plantea que los cafetales, además de producir café producen agua (Ataroff, 2002).

La mayoría de los suelos cultivados con café en Venezuela han perdido su fertilidad natural, con el consiguiente resultado que sólo se logren producciones en café verde (trillado) pocas veces superiores a 250 kg/ha, lo cual es antieconómico. De otra parte, en las zonas que reúnen favorables condiciones de clima, no existen tierras vírgenes, hecho que obliga a utilizar los mismos suelos cultivados tradicionalmente con cafetos. La alternativa de poner en práctica la aplicación de fertilizantes es, pues, insoslayable si se desea alcanzar producciones no inferiores a 1.200 kg/ha de café verde (trillado), listo para su procesamiento, de allí la importancia en considerar que el cafeto es una planta muy exigente en fertilizantes (Henao, 1982).

Para cafetales, las recomendaciones sobre fertilización, deben considerar que hasta la floración las plantas de café necesitan principalmente N y P y a partir de la floración, cuando se inicia la etapa de producción, requiere principalmente N y K, a la vez que el Ca y el Mg son muy importantes para la calidad del grano (García, 1988; Valencia, 2005).

Un estudio llevado a cabo por Martínez (2012) señala; por una parte, que los suelos de las regiones cafetaleras se encuentran agotados, por lo tanto, necesitan una permanente fertilización; por otro lado, la caficultura venezolana ha sufrido cambios profundos, tales como: dificultad de adquirir insumos agrícolas (como es el caso de la obtención y uso de fertilizantes), caficultores sin poder de decisión en la fijación de precios y con altos costos de producción, sin financiamientos oportunos, escasa y costosa mano de obra en época de cosecha, con una creciente inseguridad jurídica y ciudadana, unido a condiciones meteorológicas adversas, a la baja inversión pública agrícola y sin una tecnología acorde a los nuevos tiempos. Son factores que afectan la capacidad de

reinversión y el bajo rendimiento, con un crecimiento exponencial de las importaciones y menores ingresos por exportaciones.

Por dichas razones, el manejo orgánico (sin utilización de agroquímicos), representa una alternativa para los productores y además, vale la pena considerar que las preferencias de consumidores de economías desarrolladas, preocupados por una alimentación sana que garantice mayores expectativas de vida e interesados en conservar el ambiente, han impulsado el consumo de productos sustentables con la naturaleza y están dispuestos a pagar un sobreprecio si la producción cumple con las normas de calidad establecidas. Algunos productores cafetaleros en busca de nichos de mercado protegidos de la competencia y de los precios internacionales y con una participación más equitativa en sus cadenas de valor, han optado como estrategia para mejorar sus niveles de rentabilidad, cambiar sus cultivos de café convencional a café orgánico sostenible con el ambiente (Perea, 2010).

El uso de hongos de micorrizas arbusculares -HMA- (hongos Glomeromycota)

Señalan Armenta y col. (2010), que en México el aumento de la concientización sobre el cuidado del ambiente y la evidencia del deterioro ambiental que causan los agroquímicos ha hecho que los productores agrícolas, vean como buena alternativa la aplicación de los biofertilizantes ya que en la actualidad los productores de plántulas en invernaderos y viveros usan bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (BPCP) y hongos micorrízicos, lo que ha conllevado al incremento de microempresas productoras de abonos orgánicos que incluyen los biofertilizantes y la producción de estos insumos por los propios productores, bajo un manejo más sustentable del suelo; estas prácticas van en aumento tanto en la agricultura orgánica como en la convencional. Se está adoptando una estrategia de suministro de nutrientes a los cultivos (hortalizas y cultivos de grano), integrando una inteligente combinación de fertilizantes orgánicos, humus de lombriz y biofertilizantes; todo ello, dentro del marco de la sustentabilidad, para reducir los daños causados al ambiente y a la salud de los seres vivos por los métodos irracionales que se han empleado en las últimas décadas.

El uso de inóculos comerciales de HMA nativos de alta calidad es una práctica en ascenso dentro de los paquetes agrícolas, debido a que este producto, al tener un componente activo biológico, autóctono del suelo, no genera toxicidad y su residualidad redunda en un mejoramiento (por incremento de la materia orgánica y la biodiversidad del suelo) en la recuperación biológica de la mayoría de los agroecosistemas que han estado expuestos durante mucho tiempo al uso excesivo de fertilizantes minerales y plaguicidas, lo cual ha contribuido al deterioro de los mismos (FENIAGRO, 2010).

En la actualidad los microorganismos del suelo son considerados organismos esenciales para el manejo sustentable de la agricultura (Ibarra y col., 2014). Resultados presentados por Al-Areqi y col. (2013), demostraron que, en suelos de la rizósfera de varios cafetales estudiados en Yemen, donde las raíces del café estaban micorrizadas, se apreció la existencia de oportunidades para la aplicación de micorrización controlada en los semilleros y viveros de café, pero también en cultivos ya establecidos.

De acuerdo con Alban y col. (2013), al inocular HMA, se contribuye con la lignificación de la raíz de la planta de café; así, a medida que la cutícula se espesa, es más difícil que los nematodos penetren en las raíces de las plantas; por tanto, se contribuye con la absorción y transporte de nutrientes, mejora su estado nutricional y

estabiliza los ataques de nematodos, por lo que se estima que las interacciones simbióticas ayudan a neutralizar las interacciones parasitarias.

Las plantas jóvenes de café tienen un alto requerimiento de P, pero esto disminuye con la edad de la planta, lo que explica la importancia de la inoculación de HMA durante la etapa de vivero y en plantas recientemente trasplantadas. Por el contrario, los cultivos de plantas adultas no tienen el mismo requisito de suministro de P como lo hacen para otros nutrientes minerales. Sin embargo, otros procesos ecológicos han sido atribuidos a los hongos micorrízicos, incluyendo su contribución a la estructura del suelo, que es de gran relevancia para la sostenibilidad del agroecosistema. Los HMA influyen en la agregación de las partículas del suelo a través de procesos bioquímicos, biofísicos y biológicos, que incluyen la acción mecánica de las hifas fúngicas, la excreción de glicoproteínas y otros compuestos extracelulares, así como interacciones con la biota del suelo. La inoculación HMA en cultivos adultos puede, en cierta medida, mejorar el crecimiento de la planta, principalmente al aumentar el área de la superficie de la raíz a través de la producción de hifas extra radicales (López-Andrade y col. 2009). Además, la asociación de HMA con raíces de plantas puede aumentar la absorción de P por las plantas y competir por sitios de penetración y nutrientes de los patógenos del suelo, disminuyendo los efectos nocivos de patógenos de la raíz, como el caso de los nemátodos (Azcón y Barea, 1996).

Objetivo de la investigación.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar la colonización de hongos de micorrizas arbusculares (hongos Glomeromycota) en plantas de café de diferentes lotes de la Hacienda Cocollar (Caripe, estado Monagas).

Es importante señalar que dicha caracterización, tuvo por finalidad seleccionar la mejor muestra, con base en la riqueza de esporas y colonización micorrizica, para producir un inóculo de micorrizas nativas y utilizarlo en propagar nuevas plantas de café.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Descripción del área de estudio

La Cafetalera Cocollar, C.A., se encuentra ubicada en el sector Cocollar de la parroquia El Guácharo, municipio Caripe, estado Monagas, República Bolivariana de Venezuela; en las coordenadas geográficas 10°10’33”N; 65°31’27”O, que se corresponden con la Provincia Fisiográfica Sistema de la Costa/Tramo Oriental; Región Natural Serranía del Interior Oriental y Macizo del Turimiquire; presenta un tipo de paisaje de montaña; se encuentra en la ladera este (detrás) del Monumento Natural Alejandro de Humboldt (Cueva del Guácharo, Decreto N°180 del 15-07-1949, Gaceta Oficial N°22.970 del 15-07-1949); el tipo de relieve que predomina es de montaña, con presencia de colinas bajas y altas (Fundación Empresas Polar, 2015; Pernía, 1989). En la finca se reportan suelos arcillosos y franco arcillo arenosos, fuertemente ácidos, con desbalance en la relación calcio magnesio, con presencia de aluminio tóxico, contenidos medios y altos de materia orgánica, de nitrógeno y fósforo; bajos niveles de potasio. Clima Templado de altura tropical, temperatura media anual 18 y hasta 24°C. Precipitación anual 1.200 – 1.400 mm, Piso altitudinal: Premontano. Zonas de vida (Clasificación climática de acuerdo a Holdridge): Bosque húmedo premontano y Montano bajo (Mercado y col., 1992). El límite de temperatura mínima, llamado en el bosquejo de las zonas de vida

"temperatura crítica", que separa los pisos altitudinales premontano y monte bajo es de mucha importancia en esta formación, porque indica la extensión altitudinal superior de varios cultivos, el más notable el café (Ewel y Madriz, 1976). Vegetación: Bosques ombrófilos montanos subsiempre verdes, se desarrolla una vegetación con dos estratos arbóreos y un sotobosque denso; abundan helechos arborescentes, las epífitas, aráceas, peperomias y orquídeas. Destacan especies como el Copey (*Clusia* sp.), el Laurel (*Laurus nobilis*), el Manzanito de Montaña (*Picramnia pentandra*) y el Coco de Mono (*Lecythis ollaria*), por encima de los 1.200 msnm el sotobosque está bien desarrollado con presencia de lianas. En la fauna cabe mencionar el Guácharo (*Steatornis caripensis*), ave de hábitos nocturnos; entre los mamíferos se tienen el Tapir (*Tapirus*), el Báquiro careto (*Tayassu pecari*), la Lapa (*Cuniculus paca*) y monos de varias especies (Mercado y col., 1992).

La hacienda tiene una extensión de 200 hectáreas aproximadamente, con un área de 108,82 hectáreas con producción de café, principalmente de las variedades Caturra rojo, Caturra amarillo y el "Híbrido Caripe", que según Henao (1982), posiblemente sea una hibridación natural entre Híbrido Criollo y Borbón (ambos *Coffea arabica*).

Metodología

Se seleccionaron siete lotes de café de plantaciones adultas de "Híbrido Caripe": Dos Matas, Potrero, Natividadero, Will, Francisquito, Detrás Beneficio y la Cabellera; en cada lote se tomó una muestra compuesta, cada una de cinco rizósferas. De cada muestra, se hicieron los análisis por triplicado y se identificó:

a) Conteo de esporas (Método de filtración y decantación de Gerdermann y Nicolson, 1963; y método de centrifugación de esporas modificado de Jenkins, 1964).

b) % colonización de raíces por HMA (Método de tinción de raíces de Phillips y Hayman, 1970 y cuantificación de la colonización en las raíces de cafetos por el método de intersección de cuadrantes de Giovanetti y Mosse, 1980) y N° especies hongos Glomeromycota (se identificaron los distintos morfotipos presentes).

c) Conteo de nemátodos adultos (Método de filtración y decantación de Gerdermann y Nicolson, 1963; y método de centrifugación de Jenkins, 1964).

d) Para la preparación del inóculo, se siguió la metodología propuesta por la International Culture Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM, 2017).

Se plantea la hipótesis biológica: Al seleccionar distintas rizósferas de café de plantaciones antiguas y abandonadas de la Hacienda Cocollar, aquel suelo con menor intervención (aplicación de productos químicos: biocidas, fertilizantes) y presencia de nematodos tendrá mejor colonización de HMA y será más apto para la obtención de un inóculo en base a hongos Glomeromycota.

Análisis estadístico

a) Análisis de varianza univariado ANOVA.

b) Análisis de correspondencias (AC).

c) Para la realización del análisis de los datos se utilizó el programa de Past 3.

Hipótesis estadísticas: H0= M1 = M2 = M3 = Mn

Hi= M1 ≠ M2 ≠ M3 ≠ Mn

Donde: Mn = muestras de rizósfera de café de cada lote estudiado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las rizósferas correspondientes a los siete lotes analizados, se pueden apreciar los resultados en la Tabla I.

Tabla I. Resultados análisis cuantificación de esporas de micorrizas, de nemátodos adultos y de otra microfauna presentes en las rizósferas de plantas de café, así como % de colonización de las raíces por HMA.

Localidad **Muestras de suelo**	**N de esporas /100 g suelo seco**	**N. nematodos adultos/100 g suelo seco**	**N. otra microfauna/ 100 g suelo seco**	**Relación esporas/nematodos**	**% colonización de raíces por MA**
Dos Matas	181± 12,66	44 ± 4,59	0 ± 0	4	30 ± 2.31
Potrero	456 ±157,03	81 ± 33,98	2 ± 1,52	6	19 ± 15,25
Natividadero	785 ± 328,17	216 ± 99,52	3 ± 1,75	4	13 ± 0,90
Will	86 + 3,26	93 ± 34,81	2 ± 1,56	1	7 ± 5,71
Francisquito	281 ± 72,0	63 ± 27,81	1 ± 0,91	4	8 ± 7,73
Detrás Beneficio	166 ± 41,16	109 ± 18,55	4 ± 3,85	2	37 ± 21,35
La Cabellera	139 ± 62,30	3 ± 3,06	1 ± 0,88	45	53 ± 2,31

Valores son promedio de 3 muestras ± DS

En la Tabla I, los resultados del ANOVA indican que el número de esporas y de nemátodos adultos registrados son significativamente diferentes entre los lotes estudiados, en tanto que no se encontraron diferencias significativas en los valores de colonización micorrízica entre zonas.

Como se puede observar en la Tabla I, se hizo una relación entre el N° de esporas de micorrizas y el N° de nemátodos adultos presentes en las rizósferas estudiadas y se evidenció que el lote La Cabellera presentó un mayor valor de esta relación (45); es decir, más cantidad de esporas y menos nemátodos. A su vez, este lote fue el que reportó mayor porcentaje de colonización de micorrizas, por esta razón se recomendó su utilización en la producción del inóculo.

Vale la pena considerar que, en los casos de Dos Matas, Potrero, Natividadero y Francisquito, se observa un alto número de esporas y baja colonización micorrízica, esto se pudo deber a distintas razones, como por ejemplo, un alto contenido de P, lo que limitaría la colonización de raíces por hongos HMA; también se apreció que La Cabellera no presentó tantas esporas como Natividadero o Potrero pero se apreciaron raíces colonizadas altamente, esto, quizá a que la gran mayoría de los propágulos se encontraban en una forma distinta a las esporas, es decir, hifas extrarradicales y piezas de raíces colonizadas (Douds y col., 2005). Es importante resaltar que un inoculo está conformado no solo por la cantidad de esporas sino también por las raicillas colonizadas y el micelio de Glomeromycota.

Las muestras estudiadas se comportaron de manera distinta, esto obedece a que tienen distintas condiciones, lo que se evidencia en la Tabla II, en la cual se describen

diferentes aspectos tales como altitud (msnm), pendiente, vegetación asociada y posibles focos de contaminación.

Tabla II. Características de los lotes seleccionados para la toma de muestras.

Localidad muestras de suelo	**Altitud (msnm)**	**Pendiente (%)**	**Vegetación** (Schnee, 1984).	**Posible foco contaminación**
Dos Matas	1.186	10 a 15	Bucare (*Erythrina glauca*), Aguacatillo *(Persea laevigata*), Guamo *(Inga* sp.), Café (*Coffea arabica)*, Cambur (*Musa paradisiaca*), Bromelias.	Terreno adyacente a la carretera de San Agustín Boquerón
Potrero	1.048	20 a 25	Bucare (*Erythrina glauca*), Bucare Anauco (*Erythrina velutina*), Cedro (*Cedrus*), Samán *(Samanea saman*), *Ficus*, Yagrumo (*Cecropia peltata*), Copey (*Clusia* sp.), Pesgua (*Gaultheria odorata*), Aguacatillo *(Persea laevigata*), Aguacate (*Persea americana*), Mango (*Mangifera indica*), Café (*Coffea arabica*), Cambur (*Musa paradisiaca*), Naranjo (*Citrus aurantium*), Bromelia, Orquídeas, Helechos.	Antiguo vertedero de basura, ya eliminado. Desechos de herrería.
Natividadero	1.123	15 a 20	Bucare (*Erythrina glauca*), Bucare Anauco (*Erythrina velutina*), Matapalo (*Ficus* sp.), Lechero (*Sapium glandulosum*), Drago (*Pterocarpus podocarpus*), Siete Capas ó Cascarón (*Machaerium robiniaefolium*), Aguacate (*Persea americana*), Mango (*Mangifera indica*), Café (*Coffea arabica*), Lechoso (*Carica papaya*), Tabaquero (*Solanum triste*), Bromelias, Orquídeas, Helechos, Cola de Caballo (*Equisetum giganteum*).	Caminería hacia balnearios naturales.
Will	966	5 a 10	Bucare (*Erythrina glauca*), Bucare Anauco (*Erythrina velutina*), Majagua (*Heliocarpus trichopodus*), Matapalo (*Ficus prinoides*), Guamo *(Inga* sp.), Mango (*Mangifera indica*), Café (*Coffea arabica*), Aguacate (*Persea americana*), Cambur (*Musa paradisiaca*), Naranjo (*Citrus aurantium*), Mandarina (*Citrus reticulatus*), Bromelias, Orquídeas, Helechos.	Viviendas cercanas, sector Cocollar.
Francisquito	Sin Inf.	Sin Inf.	Sin Inf.	Sin Inf.
Detrás Beneficio	1.045	Sin Inf.	Copey (*Clusia* sp.), Bucare (*Erythrina glauca*), Roble (*Platymiscium diadelphum*), Matapalo (*Ficus prinoides*), Lechero (*Sapium glandulosum*), Guamo *(Inga* sp.), Mango (*Mangifera indica*), Pumarrosa (*Sygium jambos*), Café (*Coffea arabica*), Naranjo (*Citrus aurantium*), Mandarina (*Citrus reticulatus*), Bromelias, Orquídeas, Helechos, Cola de Caballo (*Equisetum giganteum*).	Efluentes del beneficio. Pozo séptico. Aguas servidas.
La Cabellera	1.323	5 a 10	Bucare (*Erythrina glauca*), Bucare Anauco (*Erythrina velutina*), Majagua (*Heliocarpus trichopodus*), Matapalo (*Ficus prinoides*), Guamo *(Inga* sp.), Café (*Coffea arabica*).	Difícil acceso.

Se puede observar en la Tabla II que, de los siete lotes estudiados, el de La Cabellera se encuentra a mayor altura (1.323 msnm), con árboles de sombra y leguminosas, baja pendiente (5 a 10%) y menos intervenido, debido al difícil acceso. Estas características corroboran lo planteado en la hipótesis biológica; es decir, que la rizósfera de café del suelo que presentó menor intervención (aplicación de productos químicos: biocidas, fertilizantes) tuvo mejor colonización de HMA.

Al realizar un análisis de correspondencia múltiple, se consideró para cada lote estudiado: el N° de esporas de micorrizas, el N° de nemátodos adultos, el % de colonización de HMA en las raíces de las plantas estudiadas, así como la altitud (msnm) en que se encontraba cada lote; el resultado de este análisis lo podemos observar en la Figura 1.

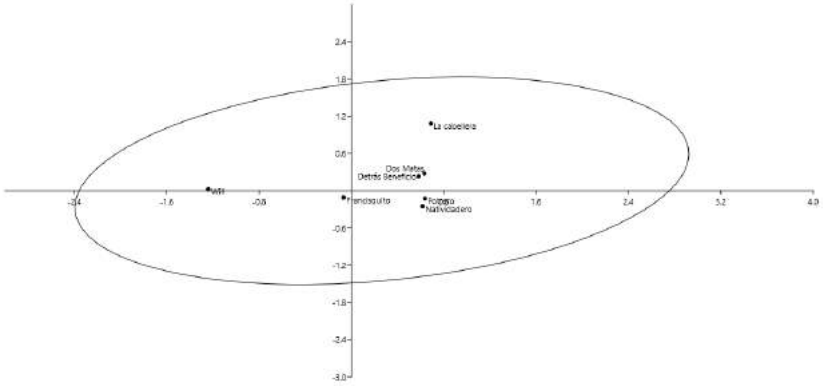


Figura 1. Análisis de Correspondencia para las siete rizósferas estudiadas.

Se puede apreciar, en la Figura 1, que todas las localidades estudiadas guardaron correspondencia, pero destaca La Cabellera, en la cual, coincidiendo con lo señalado anteriormente, se presentaron las correlaciones positivas, seguida de Dos Matas y Detrás de Beneficio.

Vale la pena resaltar el lugar del lote Will en la Figura 1, con valores negativos (por su ubicación en el cuadrante), que a su vez fue el lote con el valor más bajo de % de colonización de raíces por HMA (7%) y N° de esporas (86 esporas/100 g de suelo), lo que coincide con Del Aguila et al. (2018), quienes reportaron que a alturas entre 800-1000 msnm encontraron menos % de colonización en raíces de HMA de plantas de café.

Al estudiar las esporas de micorrizas presentes en el lote La Cabellera, se pudieron identificar seis (6) morfotipos diferentes, los cuales se presentan en la Tabla III.

La rizósfera del lote La Cabellera se utilizó como base para preparar el inóculo de HMA nativas, fue realizado en la Hacienda Cocollar, al mezclarlo con arena en una proporción 1:1 y se sembró con maíz (*Zea mayz*) como cultivo trampa; luego de unos seis (6) meses, el sustrato que quedó resultó abundante en esporas de Glomeromycota, raíces colonizadas, micelio y constituyó el inóculo. La aplicación de éste en vivero, reportó plantas con mayor desarrollo radicular, tal y como se aprecia en la Figura 2.

Tabla III. Morfotipos de esporas presentes en la rizósfera de café (*Coffea arabica*) del lote La Cabellera de la Hacienda Cocollar.

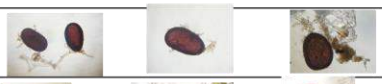
Morfotipo de espora de HMA		Foto
1	De color marrón oscuro, ovalada	
2	De color marrón claro, redonda con hifa	
3	De color marrón claro, redonda, sin hifa	
4	De color amarillo claro, transparente, redonda, pequeña, con hifa	
5	De color amarillo claro, transparente, redonda, grande, sin hifa	
6	De color marrón claro, con hifa, agrupada.	



Figura 2. Foto de plantas de café (*Coffea arabica*) sembradas en vivero con y sin aplicación del inóculo de micorrizas preparado con base a la rizósfera del lote La Cabellera, Hacienda Cocollar.

CONCLUSIONES

La muestra rizosferica correspondiente al lote La Cabellera fue la que se recomendó utilizar como fuente nativa para la producción de inóculos de HMA, debido a su alto % de colonización de raíces (53%), alto número de esporas (139 esporas/100 g de suelo) y poca presencia de nemátodos (3 adultos/100 g de suelo). Presentó seis (6) morfotipos distintos de esporas de HMA.

De la metodología descrita, los aspectos que facilitaron la selección de HMA nativos para la producción de inóculos en campo, fueron:

- La relación entre N° de esporas / N° de nemátodos adultos, que resultó ser un buen indicador para la selección de la mejor rizósfera a utilizar en la elaboración de un inóculo de HMA.
- Las mejores condiciones para obtener el inóculo; que, de acuerdo con las rizósferas estudiadas, se correspondió a las plantas de cafetales adultos, en zonas altas, con

poca intervención (otros cultivos, aplicación de pesticidas, bote de residuos, tránsito de personas).

En el lote de plantas de café a baja altitud (966 msnm), se reportó el menor % de colonización de raíces por HMA (7%) y N° de esporas (86 esporas/100 g de suelo), a la vez un alto contenido de nemátodos (93 nemátodos adultos/100 g de suelo).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa "Cafetalera Cocollar, C.A.", quienes han apoyado esta investigación y desarrollan un valioso proyecto de producción primaria de café con manejo orgánico.

REFERENCIAS

Al-Areqi, A., Cgliyeh, M., Sghir, F., Ouazzani, A., Benkirane, R. and Douira, A. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of Coffea arabica in the Republic of Yemen. *J. Appl. Biosci*. 64:4888-4901 (2013).

Alban, R., Guerrero, R. and Toro, M. Interactions between a Root Knot Nematode (*Meloidogyne exigua*) and Arbuscular Mycorrhizae in Coffe Plant Development (*Coffea arabica*). *American Journal of Plant Sciences*, 4, 19-23 (2013). http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.47A2003

Armenta, A., García, C., Camacho, J., Apodaca, M., Gerardo, L. y Nava, E. Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1):51-56 (2010).

Arismendi, J. *Presentación geográfica de las formas de relieve*. Capítulo 11. Libro 2. Medio Físico y Recursos Ambientales. Colección GeoVenezuela. Editado por la Fundación Empresas Polar (2007).

Ataroff, M. Precipitaciones e intercepción en ecosistemas boscosos de los Andes venezolanos. *Ecotropicos*. 15(2):195-202 (2002).

Azcón, C. and Barea, J. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens – an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza*.6:457–464 (1996).

Berlingeri, C., Alvarado, C., Silva-Acuña, R., Marín, C., La Cruz, L., Durán, D., Medina, A. y Bustamante, J. Evaluación agronómica de 18 líneas de café en la localidad de La Vitu, Estado Trujillo, Venezuela. *Bioagro*, 19(1):27-33 (2007). Recuperado en 11 de abril de 2017, de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612007000100004&lng=es&tlng=es

Chanie, T. and Assefa, F. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with shade trees and *Coffea arabica* L. in a coffe-based agroforesty system in Bonga, Southwestern Ethiopia. *Afrika Focus*. 26(2):111-131 (2013).

Del Aguila, K., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L. y Becerra, A. Efecto de Inoculación de Consorcios de Micorrizas Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información tecnológica*, 29 (1), 137-146 (2018). https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137

Douds Jr, D., Nagahashi, G., Pfeffer, P., Kayser, W. and Reider, C. On-farm production and utilization of arbuscular mycorrhizal fungus inoculum. *Canadian Journal of Plant Science*, 85 (1), 15-21 (2005).

Ewel, J.J. y Madriz, A. *Zonas de Vida de Venezuela*. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico (2da. edición) Ediciones del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP) MAC. Caracas, Venezuela. 270 p. (1976).

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*). Los fertilizantes y su uso*. Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes. 83 pp. (2002).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *Training manual for Organic Agriculture*. Edited by Climate, Energy and Tenure Division and the Research and Extension Division of the FAO. 105 pp. (2015).

FENIAGRO (Federación de Cooperativas Agroindustriales de Nicaragua). *Proyecto: Biofertilizantes, bioprotectores y biorestauradores Micorricicos para la producción agroecológica en las fincas de los Productores de café.* Managua, Nicaragua.: FENIAGRO, R.L. (2010).

Fundación Empresas Polar. *GeoVenezuela. Apéndice Cartográfico*, Caja C. Mapas Estadales. Estado Monagas, mapas: División Político Territorial, Unidades Físico Naturales y Uso de la Tierra (2015).

García, N. *Cafetales y café*. Edición del Ministerio de Agricultura y Cría y el Instituto Nacional de Hipódromos. 225 pp. (1988).

Gerdermann, J. and Nicolson, T. Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting. Trans. *Br. Mycol. Soc*. 46:235-244 (1963).

Giovanetti, M. and Mosse, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 84:489-500 (1980).

Henao, J. *El café en Venezuela.* Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca. Caracas.291 pp. (1982).

Ibarra, J., Aguirre, J., Ley-De Coss, A., Cadena, J. and Zavala, G. Coffea canephora (Pierre) ex Froehner Inoculado con micorriza y bacteria fijadora de nitrógeno en vivero. *Revista Chapingo Serie Horticultura,* 20(2): 201-213 (2014).

Jenkins, W. A rapid centrifugal flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Rep*. 48, 692 (1964).

INVAM: International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Recuperado el 11 de mayo de 2017 en: https://invam.wvu.edu/cultures (2017).

López-Andrade, S., Mazzafera, P., Schiavinato, M. and Silveira, A. Arbuscular mycorrhizal association in coffee (Review). *Journal of Agricultural Science*, 147:105–115 (2009).

Martínez, L. *El café venezolano, un cultivo en riesgo de desaparecer*. XII Coloquio de Geocrítica. Del 7 al 11 de mayo. Bogotá, Colombia. (2012).

Mercado, C., Peñalver, J. y Torrealba, I. *Áreas Naturales Protegidas de Venezuela*. Edición del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Banco Latino, Banco de Maracaibo y Fundación Polar (1992).

Paul, E. *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. Fourth Edition. Academic Press is an imprint of Elsevier. Oxford, UK. 582 pp. (2015).

Perea, J. *El café orgánico, una ventaja competitiva para los productores cafetaleros del estado de Veracruz.* Investigación Administrativa, núm. 105, enero-junio, pp. 23-39. Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás. Distrito Federal, México. (2010).

Perfecto, I., Vandermeer, J., Mas, A. and Soto, L. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. *Ecological Economics*, 54(4), 435-446 (2005).

Pernía, E. *Guía práctica de fotointerpretación*, Capítulo 6: Clasificación de la fisiografía de Venezuela. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela. (1989).

Phillips, J. and Hayman, D. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans Br. Mycol. Soc.* 55:158-161 (1970).

Puente, M., García, J., Rubio, E. y Perticari, A. Microorganismos promotores del crecimiento vegetal empleados como inoculantes en trigo. *Revista Horizonte A. Magazine de las ciencias agrarias.* 6(23):14-17 (2009).

Scheene, L. *Plantas comunes de Venezuela*. Colección Ciencias Biológicas. Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca, Caracas. (1984).

Valencia, G. *Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto.* Edición de: International Plant Nutrition Institute (IPNI). 10 pp. (2005).

FLUJOS DE DETRITOS RECIENTES EN LOS ALREDEDORES DEL CERRO LAS LEÑAS Y LA RUTA N°7, MENDOZA. ANÁLISIS DEL RIESGO GEOLÓGICO ASOCIADO.

Winocur D.[a,b], Benitez A.[a,b], Hurtado M. B.[a] y Negri Martin M. C.[a]

[a]*Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.*
[b]*Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN) – (UBA–CONICET).*

e-mail: winocur@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

Durante los últimos años, la Ruta Nacional Nº7 se ha visto afectada por diversos procesos de remoción en masa que interrumpieron el tránsito vehicular y la comunicación entre las localidades mendocinas de alta montaña, y el acceso al paso fronterizo Cristo Redentor, entre Argentina y Chile. El objetivo del presente trabajo es caracterizar y analizar la actividad de abanicos coluviales en cercanías al Cerro Las Leñas durante la última década. En particular, se exponen eventos de flujos de detritos ocurridos en los períodos de verano de 2015-2016 y 2018-2019. A partir de datos de campo, un vuelo con un VANT (vehículo aéreo no tripulado) e interpretación de imágenes satelitales, fue posible elaborar mapas temáticos, que en conjunto con el análisis de parámetros morfométricos de las cuencas alimentadoras, permiten establecer la evolución del paisaje y determinar diferentes grados de actividad de los abanicos coluviales y el riesgo geológico asociado con la ruta. Finalmente, se evalúa la eficacia de las distintas medidas de mitigación estructurales aplicadas en este sector y se proponen posibles alternativas para el mejoramiento de las mismas.

Palabras clave: Riesgo Geológico, Flujo de detritos, Cordillera Principal, Mendoza, Ruta N°7.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se sitúa en la alta cordillera mendocina, entre la localidad de Las Cuevas y el ingreso al Parque Nacional Aconcagua. La misma es atravesada por la Ruta Nacional Nº7, importante vía de acceso a las localidades andinas del noroeste de Mendoza y única conexión de estas localidades con Chile, que además representa la principal ruta comercial internacional de Argentina. En particular, la zona de trabajo está comprendida entre los 32°46' y 32°49' S y los 70°00' y 69°58' O (ver Fig. 1). Se encuentra enmarcada en la provincia geológica de Cordillera Principal, formando parte de la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (Ramos, 1988; Cegarra y Ramos, 1996). Se caracteriza por la presencia de sedimentitas de origen marino y continental de edad Mesozoica, y niveles sedimentarios y volcánicos Cretácicos, dispuestos en láminas de corrimientos con vergencia oriental desarrollados en conjunto con el volcanismo Neógeno (Ramos, 1996). La cobertura cuaternaria corresponde a depósitos de remoción en masa, glaciarios, aluviales y coluviales (Cegarra y Ramos, 2008).

El clima de la región es clasificado como polar de tundra (Norte, 1996). Las precipitaciones oscilan entre 300 y 500 mm por año, distribuidas mayormente durante el invierno, mientras que los meses de diciembre a febrero constituyen la estación seca en los Andes Subtropicales (32º–36ºS), con un 10% de la acumulación anual en forma de lluvia

(Moreiras, 2010). Debido a que las precipitaciones estivales se concentran en eventos de unos pocos días (Santos *et al*., 2015), las mismas tienen el potencial de desencadenar flujos de detritos y deslizamientos en las pendientes andinas (Viale y Garreaud, 2014). Varnes (1978) clasifica a los flujos de detritos como un movimiento en masa rápido, en donde sedimentos y materia orgánica con el aire y agua en poros, dan lugar a una corriente que escurre pendiente abajo.

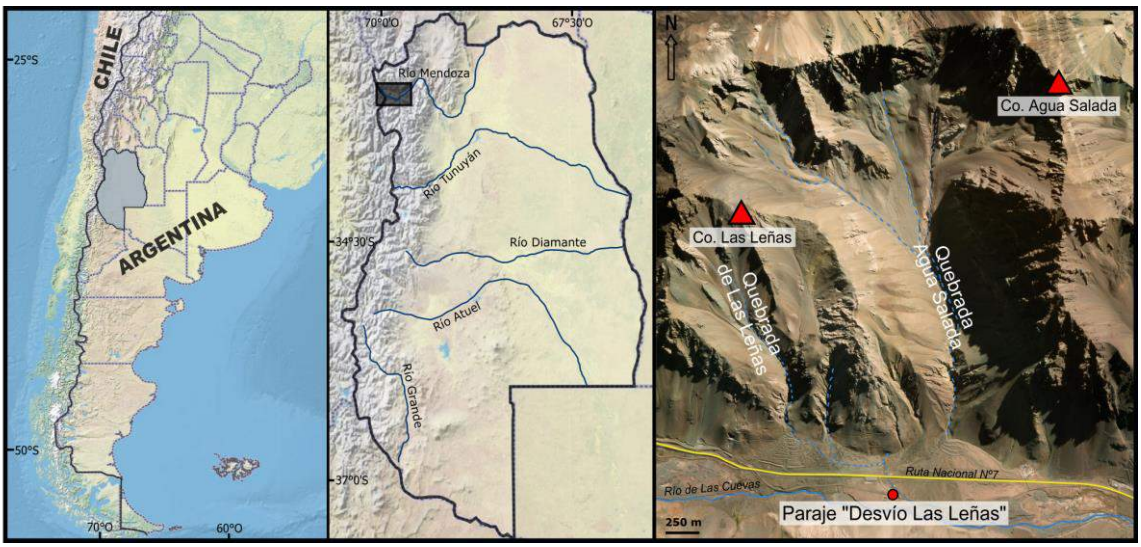


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Comprende el sector noroccidental de la provincia de Mendoza.

La zona analizada en este trabajo se enmarca en un área que, dadas sus características geológicas y climáticas, se ha encontrado sometida a procesos de remoción en masa de diversas escalas y volúmenes involucrados, durante el Pleistoceno y Holoceno, hasta la actualidad. Los eventos de mayores dimensiones corresponden a megadeslizamientos, movimientos gravitacionales profundos y avalanchas de rocas (Fauque *et al*., 2009), mientras que los eventos de menores dimensiones corresponden principalmente a flujos de detritos. Tales procesos constituyen un riesgo geológico, de manera que se han elaborado mapas de riesgos a la remoción en masa e inventarios de estos procesos a lo largo del valle del río Mendoza y en tramos específicos (Espizua *et al*., 1993; Moreiras, 2005). La ocurrencia de eventos de flujos de detritos y caídas de rocas en la actualidad está influenciado por la litología y las pendientes, aunque los sismos y las lluvias torrenciales serían los principales factores desencadenantes (Moreiras, 2003). Además, se han establecido la frecuencia y recurrencia de los principales procesos de remoción en masa que tienen lugar en este sector (Moreiras, 2006).

Adicionalmente, a partir del análisis de datos meteorológicos y modelos numéricos atmosféricos regionales, se ha propuesto que las tormentas convectivas en áreas cordilleranas son la principal causa de la ocurrencia de aludes en la región (Santos *et al.*, 2015). Winocur *et al*. (2017) han establecido una relación entre los eventos de remoción en masa que afectaron la circulación de la Ruta Nacional Nº7 durante enero y febrero de 2016, y factores climáticos como la temperatura y las precipitaciones ocurridas en los meses y días previos. En contraposición, Vergara Dal Pont *et al*. (2018) indican que la influencia de las lluvias en días anteriores a los eventos de remoción en masa es baja, en concordancia con las observaciones de Coe *et al.* (2008) y Kean *et al*. (2013).

La traza de la Ruta Nacional Nº7, que recorre este valle hasta el límite internacional con Chile, es utilizada por más de 500 camiones y micros por día, superando los 800 durante los meses de verano, comportamiento que se replica en automóviles particulares que alcanzan

los 45000 mensuales en meses estivales (Servicio Nacional de Aduanas de Chile). Ante la ocurrencia de eventos de flujos de detritos que alcanzan la ruta, los automóviles pueden ser arrastrados, los sistemas de drenaje pueden ser obstruidos, se pueden destruir las estructuras preventivas, bloquear los túneles y dañarse el pavimento (Moreiras, 2006).
En este trabajo se describen y analizan una serie de eventos de flujos de detritos ocurridos entre los años 2015 y 2019 en tres abanicos coluviales desarrollados en la ladera norte del valle del río de Las Cuevas, en el kilómetro 1226 de la Ruta Nacional Nº7, algunos de los cuales fluyeron sobre el camino obstruyendo completamente el tránsito vehicular. La caracterización de los depósitos, los parámetros morfométricos y el análisis de los daños generados, nos permiten realizar una evaluación del riesgo asociado a posibles eventos futuros y proponer medidas de mitigación en respuesta a ello.

METODOLOGÍA

Se realizó un relevamiento de campo en los alrededores del Cerro Las Leñas, determinando la geomorfología de la zona. Para cada uno de los abanicos coluviales se identificaron las áreas activas y se describieron los depósitos de flujos recientes, su extensión, espesor y sedimentología. Se caracterizaron todas las medidas estructurales asociadas a la traza de la ruta, las medidas asociadas a la contención de futuros eventos al norte de la ruta, y la metodología de limpieza y removilización del material depositado por los flujos de detritos. El análisis se complementó con la interpretación de imágenes satelitales actuales e históricas obtenidas de *Google Earth Pro y ESRI Imagery* y una imagen de detalle del abanico coluvial oriental obtenida mediante un VANT *Mavic Pro.* Para identificar los flujos de detritos activos e inactivos se utilizaron los criterios propuestos por Crozier (1984).
Se calcularon parámetros morfométricos de las cuencas de las cuales provienen los flujos de detritos analizados, y se confeccionó un mapa de pendientes utilizando el software *QGIS.* Estos datos se analizaron en conjunto con el mapa geomorfológico en base GIS para evaluar el riesgo geológico asociado a cada una de las cuencas y sus respectivos abanicos coluviales.

GEOMORFOLOGÍA

El paisaje en los alrededores del valle del río de Las Cuevas, resulta de rasgos heredados de la última glaciación, los cuales han sido retrabajados por la acción fluvial y la remoción en masa que en altitudes superiores a 3200 msnm se enmarcan en un ambiente periglacial (Corte, 1983). Así, las geoformas de origen glaciario presentes en el área corresponden a circos, espolones truncados, valles colgados y artesas, mientras que las geoformas criogénicas corresponden a glaciares de roca (ver Fig. 2). Los procesos de remoción en masa actúan como modeladores secundarios del paisaje, siendo geoformas típicas los conos de talud, taludes, abanicos coluviales y flujos de detritos. El colector principal corresponde al río de Las Cuevas, el cual descarga directamente en el río Mendoza.
En la zona analizada se reconocen tres abanicos coluviales. El abanico coluvial oriental AOr recibe el aporte de la cuenca 1, el abanico occidental AOc es alimentado por la cuenca 2 y el abanico central, de menores dimensiones, se desarrolla al pie de la cuenca 3.

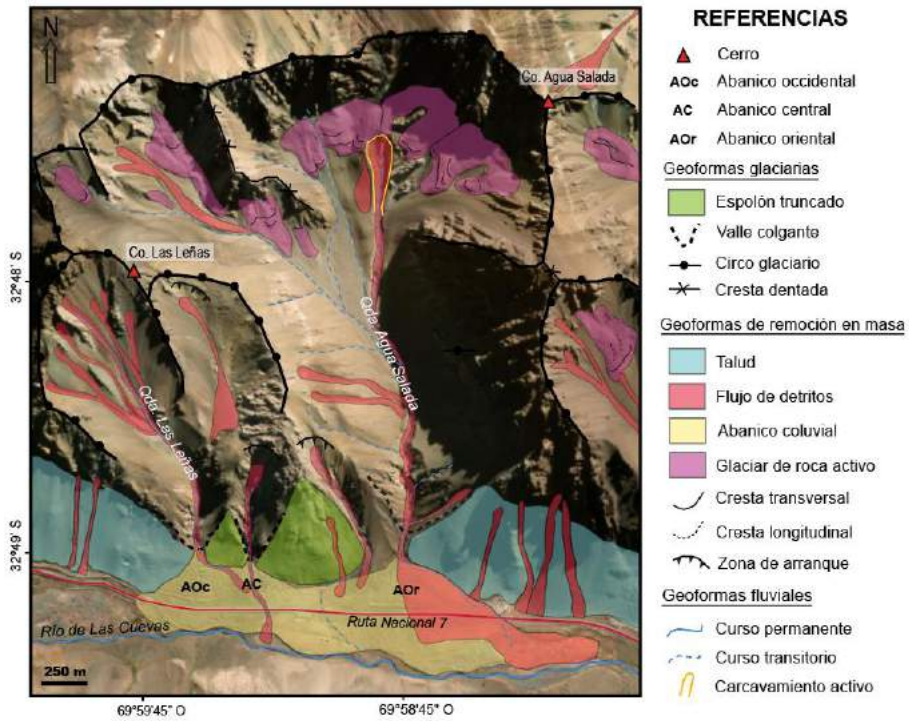


Figura 2. Geoformas principales en la zona de estudio. Se indican las quebradas que alimentan los abanicos coluviales referidos en el texto. AOc: abanico coluvial occidental, AC: abanico coluvial central, AOr: abanico coluvial oriental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eventos en los abanicos coluviales occidental y central

A comienzos de 2009 ocurrió un flujo de detritos en el abanico occidental, alimentado desde la quebrada Las Leñas. En respuesta, se colocaron 6 filas de disipadores de energía en forma de montículos (ver Figs. 3 y 4 a) en la mitad oriental del abanico. A su vez, se construyó un albardón inmediatamente al norte de la Ruta Nº7. Posteriormente, en 2013, se duplicó la cantidad de disipadores de energía, extendiendo hacia el oeste los que habían sido construidos previamente (ver Fig. 4 b). El albardón ubicado al norte de la ruta también fue extendido en el mismo sentido. En este abanico coluvial se registró actividad intermitente de un pequeño canal con dirección SE, pero que no significó un peligro mayor. Entre 2013 y 2014, este pequeño canal activo fue desviado hacia el este y rectificado, con el fin de unir su recorrido con el canal del abanico central y que ambos alcanzaran un pequeño arroyo para finalizar desembocando en el río de Las Cuevas. La rectificación del curso se llevó a cabo mediante la modificación de un albardón natural preexistente (ver Fig. 4 c).
Posteriormente, en 2016, tres filas de disipadores fueron añadidas en la región extrema oeste del abanico occidental, aunque en dicho sector no se registró ningún evento importante de remoción en masa posterior al ocurrido en 2009. En 2018 y 2019, tanto el abanico occidental como el central presentaron escasa actividad en sus quebradas. Así, la rectificación realizada para unir los cursos activos de ambos abanicos resultó efectiva, ya que no estuvo expuesta a eventos de flujos de detritos y/o escorrentía superficial que involucren volúmenes significativos. La actividad de estos abanicos entre 2010 y 2019 no generó ningún impacto considerable sobre los asentamientos ni sobre la Ruta N°7.

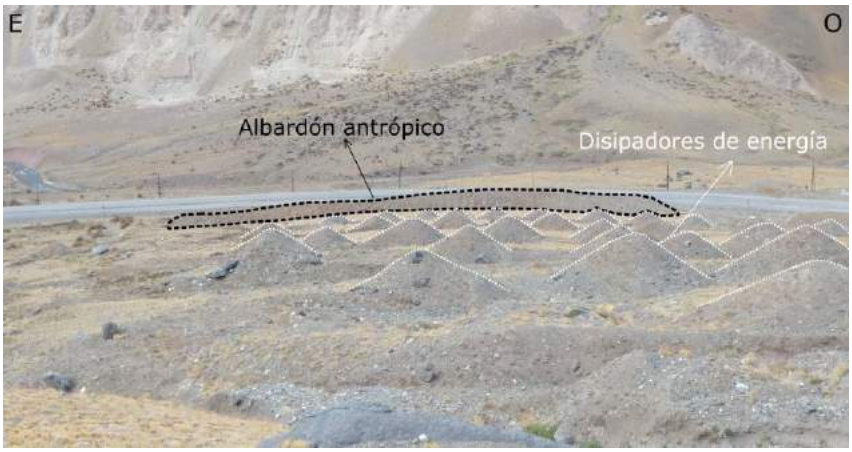


Figura 3. Vista desde la quebrada Agua Salada en dirección hacia el sur. Se observan albardones antrópicos y disipadores de energía construidos en el abanico occidental en el año 2009. Fotografía tomada en abril de 2019.

Eventos ocurridos entre 2015 y 2019 en el abanico coluvial oriental

Los flujos de mayor magnitud ocurrieron en el abanico coluvial oriental, particularmente entre 2015 y 2019 (ver Fig. 4). Si bien no fue posible determinar con certeza la fecha del primer evento de gran extensión, el mismo ocurrió entre fines de noviembre de 2015 y enero de 2016. El flujo atravesó la Ruta N°7 en el km 1226, afectando un tramo de 695 m, y finalizando en el río de Las Cuevas. El área ocupada por el depósito ronda los 267 m^2. Para mitigar los efectos de un posible flujo posterior, se construyeron 7 albardones con el propio material depositado por el flujo: 4 de ellos se ubicaron a la salida de la quebrada Agua Salada, mientras que los otros 3 fueron construidos en las proximidades de la ruta, cerca de un albardón preexistente (ver Fig. 4 c).

En las imágenes correspondientes al periodo 2016-2018 se observa una variación en la extensión y morfología de los depósitos de flujos de detritos activos, principalmente al sur de la Ruta Nº7 (Figs. 4 c y d) y en cercanías al ápice del abanico (Figs. 5 a y b). Sin embargo, la extensión de cada uno de los pulsos no pudo ser identificada e individualizada, debido a la acotada dimensión de los eventos. Los mismos no tuvieron impacto sobre la ruta, ya que el volumen de material involucrado pudo desagotar por los drenajes sin colmatarlos.

El segundo acontecimiento de grandes dimensiones ocurrió entre el 25 de diciembre de 2018 y el 4 de enero de 2019 y se dio, como mínimo, en 3 pulsos (ver Figs. 4 e). Este evento de flujos de detritos rompió y sobrepasó los albardones construidos con el material removilizado del depósito de 2015-2016, y afectó un tramo de 173 m de la Ruta Nº7, deteniéndose al toparse con la elevación del Tren Trasandino (ver Fig. 7). La superficie ocupada por los depósitos ronda los 91.4 m^2. Los drenajes debajo de la ruta fueron parcialmente obstruidos y no fueron debidamente vaciados luego del evento. En cuanto a la ruta en sí, esta se vio interrumpida por unas horas pero no sufrió mayores daños. Y finalmente las estructuras de contención, que en este caso eran albardones antrópicos construidos con el material de flujos previos, no fueron suficientes para contener el último flujo; este sobrepasó y rompió algunos albardones, abriéndose paso a través de ellos, incorporando parte del material de los mismos y arrastrándolo pendiente abajo.

El depósito final se caracteriza por la presencia de bloques de tamaños que alcanzan 1 m de largo medido sobre el eje mayor, en cercanías al ápice del abanico coluvial, y tamaños menores con media entre 0.2 y 0.3 m en cercanías a la ruta. La composición de los clastos es variable, con predominio de rocas ígneas y sedimentarias aflorantes a lo largo de la quebrada Agua Salada, son angulosos a subredondeados y la matriz es predominantemente

fangosa, evidenciando un depósito muy mal seleccionado (ver Fig. 5 a-c). Los depósitos de los flujos que se extendieron hacia el sector al sur de la Ruta Nº7, presentan una mayor proporción de sedimentos fangosos en relación con los bloques, y la fracción gruesa corresponde a guijas y guijarros (ver Fig. 5 d).

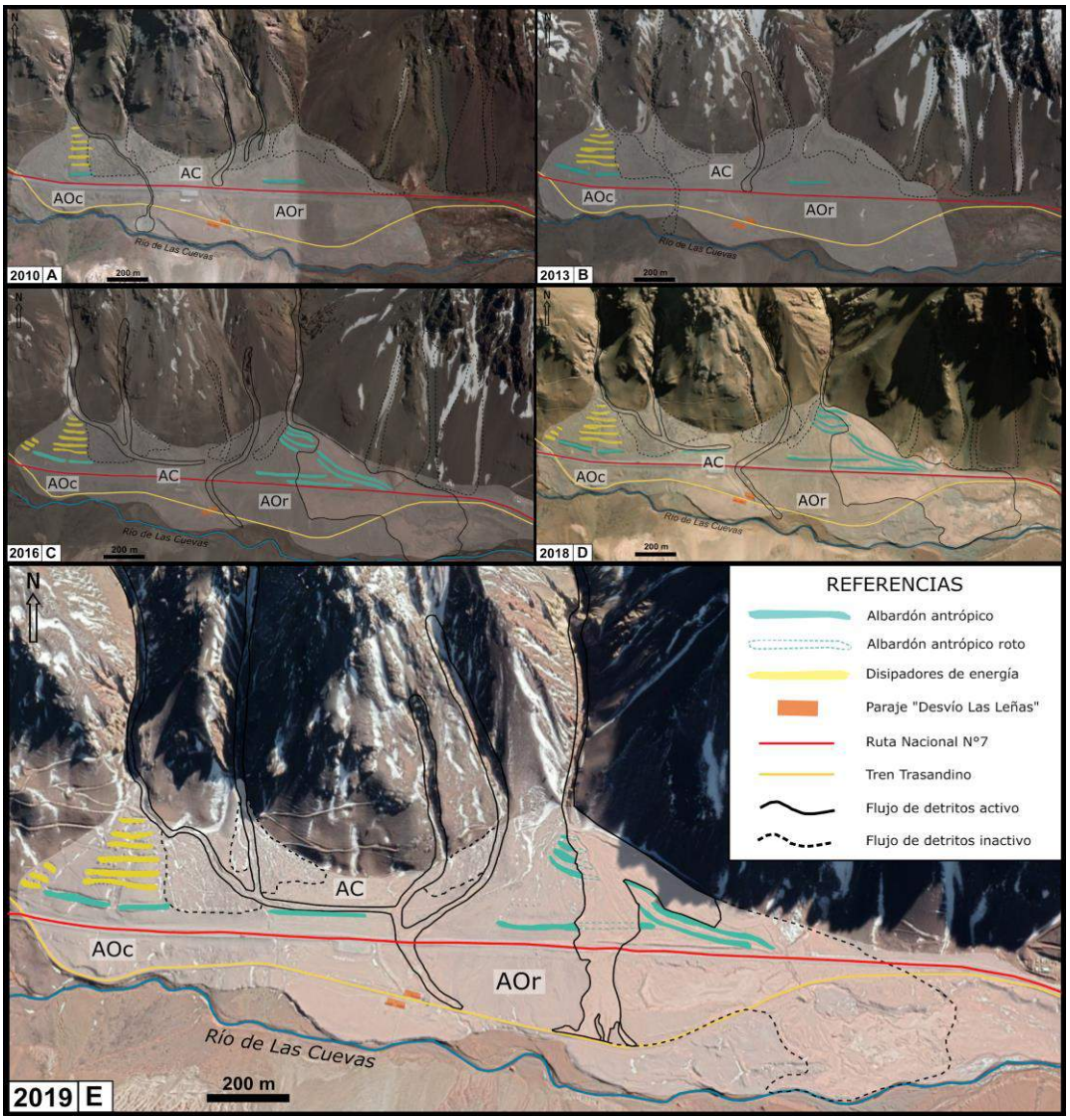


Figura 4. Eventos de flujos de detritos ocurridos en los abanicos coluviales analizados y medidas estructurales transitorias para distintos años. **a.** Año 2010, con un albardón en el AOr, y algunos disipadores en el AOc. **b.** Año 2013, con similares características. **c.** Año 2016, con un aumento de albardones en el AOr. Observar la rectificación del canal aguas abajo de la unión entre los canales activos del AOc y AC. En el AOr se indica la ocurrencia de un flujo de detritos que traspasó la RN 7. **d.** Año 2018, con similares características a los años previos. **e.** Año 2019, donde se indica el flujo de detritos ocurrido en el AOr a principios de dicho año, que ocasionó el rompimiento de albardones.

En base a datos de espesores medidos en distintos puntos (ver Fig. 6), se calculó un volumen acumulado para los depósitos de flujos de detritos en el abanico oriental. Dado que al sur de la ruta el material fue removilizado posteriormente, en los cálculos se consideró únicamente el área abarcada al norte de la ruta, de manera que el volumen calculado es menor al volumen de material involucrado. Así, se estimó un volumen acumulado de 45.7 m^3 para los depósitos de flujos ocurridos entre 2015 y 2019 al norte de la Ruta N°7 (ver Tabla 1).

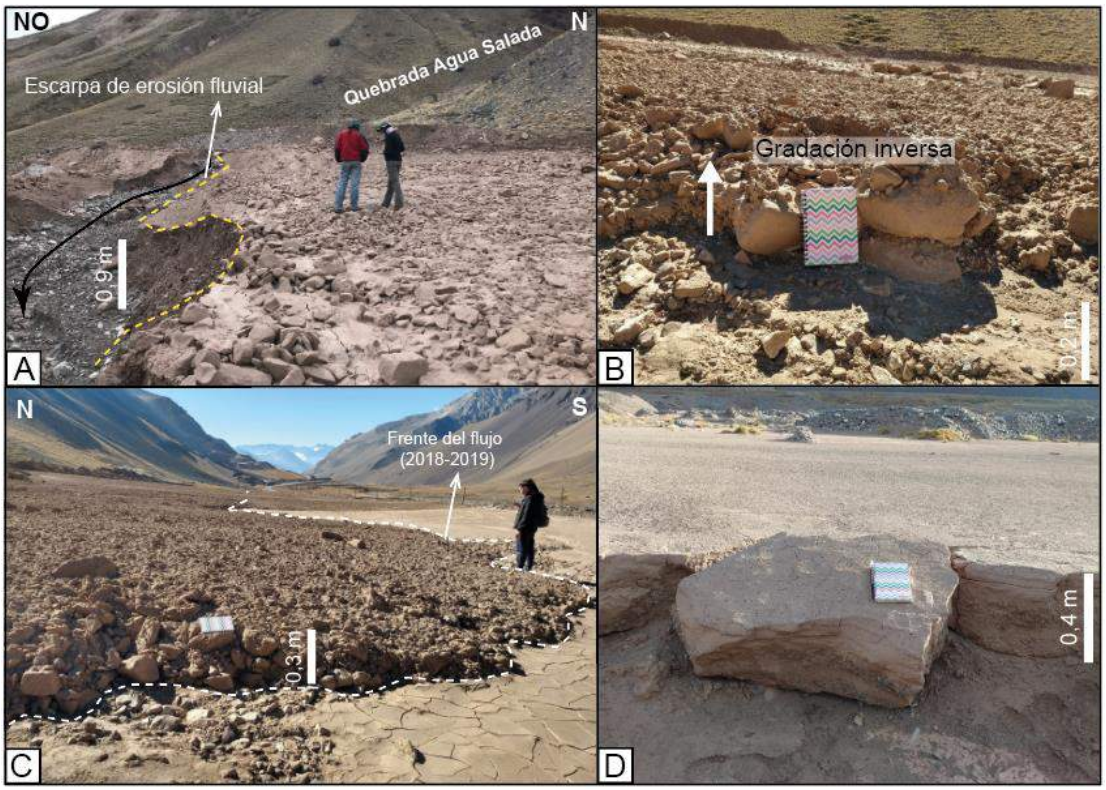


Figura 5. Depósitos de flujos de detritos en el abanico oriental. **a**. Depósito próximo a la quebrada Agua Salada, correspondiente al Punto 1 de la Figura 6. **b.** Gradación inversa registrada en el frente del depósito del flujo del período 2018-2019, correspondiente al Punto 2 de la Figura 6. **c.** Frente de flujo ocurrido en 2018-2019. Punto 4 de la Figura 7. **d.** Depósito al sur de la Ruta Nacional Nº7, con tamaño de grano más fino.

Tabla 1. Áreas correspondientes a los depósitos de flujos de detritos ocurridos en 2015/2016 y 2018/2019.

Fecha del evento	11/ 2015 - 01/2016	12/2018 - 01/2019
Área afectada al norte de la ruta	126 m^2	70.1 m^2
Área afectada al sur de la ruta	141 m^2	21.3 m^2
Longitud del tramo de ruta afectado	695 m	173 m
Volumen acumulado estimado al N de la ruta	45.7 m^3	

Análisis de parámetros morfométricos

Para caracterizar las cuencas que alimentan los abanicos coluviales estudiados fueron calculados una serie de parámetros morfométricos que incluyen perímetro, área, longitud y ancho, desnivel altitudinal y pendiente media del cauce (ver Tabla 2).

El tamaño de una cuenca influye en gran medida en la producción de sedimentos y en la respuesta hidrográfica. A mayor tamaño de la cuenca, mayor es la cantidad de sedimento y la descarga, pero esta relación no es aritmética. A estas altitudes una mayor área representa una mayor superficie ocupada por hielo durante el invierno y, con ello, la posibilidad de generar mayor escorrentía durante períodos estivales. La superficie de la cuenca 2 abarca, aproximadamente, un tercio del área de la cuenca 1 y, al igual que esta, acumula nieve en los meses más fríos. En contraposición, la cuenca 3 corresponde a una única quebrada de

dimensiones muy limitadas y sin acumulaciones de nieve significativas. Respecto de la longitud del cauce principal, la misma influye en la generación de escorrentía. A mayores longitudes del cauce, la cantidad de agua que circula por el mismo puede ser mayor. Considerando esto, la escorrentía de la cuenca 1 superaría a la de la cuenca 2, y ambas serían mayores a la de la cuenca 3.

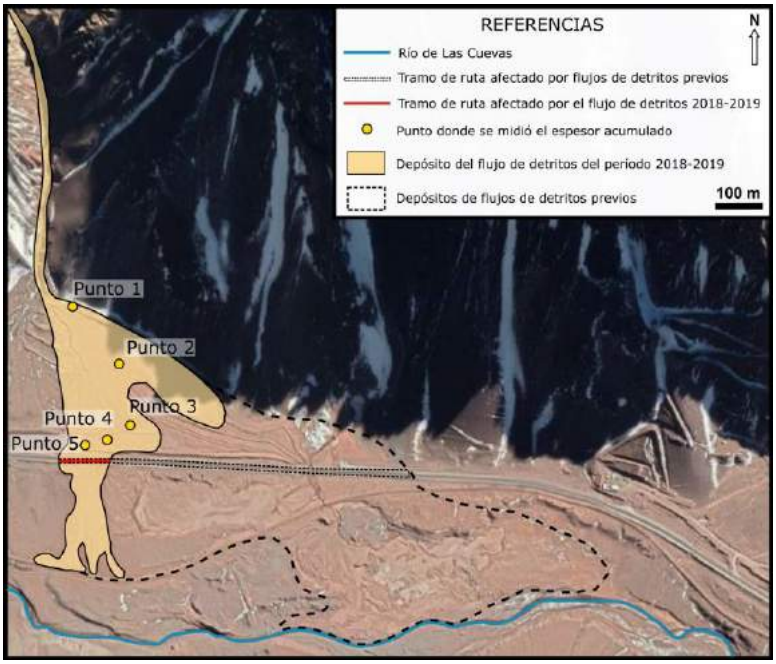


Figura 6. Alcance de los flujos de detritos ocurridos en 2016 y 2019 en el abanico oriental y puntos donde se tomó el espesor acumulado de los depósitos, utilizados para el cálculo volumétrico.

Tabla 2. Parámetros morfométricos calculados para las tres cuencas que alimentan los abanicos coluviales.

Parámetros morfométricos	Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 3
Perímetro	10,65 km	5,205 km	1,74 km
Área	5,76 km^2	1,685 km^2	0,16 km^2
Longitud	3,235 km	1,975 km	0,745 km
Ancho	1,78 km	0,85 km	0,214 km
Desnivel altitudinal	1283 m	988 m	481 m
Pendiente media del cauce	0,40	0,50	0,65

El desnivel altitudinal es inversamente proporcional al tiempo de concentración de una cuenca. Este tiempo también está relacionado con el área de la cuenca y la longitud del recorrido. Las cuencas con desniveles importantes son inestables, principalmente si además poseen pendientes altas y superficies pequeñas (Meza Aliaga *et al*., 2014). De este modo, la cuenca 1 posee el menor tiempo de concentración mientras que la cuenca 3 presentará el mayor tiempo de concentración, y la cuenca 2 mantiene un valor intermedio.

Aquellas cuencas que son más alargadas tienden a generar crecidas más graduales y menos violentas (Delgadillo *et al*., 2009). Sin embargo, este no es el único factor a tener en cuenta al momento de evaluar el riesgo de una cuenca a sufrir procesos de remoción en masa. En el caso de la cuenca 1, si bien es una cuenca alargada, los elevados valores en el desnivel

altitudinal influyen en una mayor inestabilidad y, en consecuencia, dicha cuenca presenta mayor tendencia a sufrir procesos de remoción en masa, a la vez que son esperables tiempos de concentración cortos. Esto se ve reflejado en el registro histórico de los distintos eventos de flujos de detritos que tuvieron lugar en el valle del río de Las Cuevas provenientes de esta cuenca. Además, en las cabeceras de las cuencas 1 y 2, se desarrollan glaciares de roca activos, de manera que existe un mayor aporte hídrico dado por estas geoformas, lo cual incrementa el riesgo a la ocurrencia de flujos de detritos. Sin embargo, en la cuenca 2 la recurrencia y volúmenes involucrados en eventos de flujos de detritos serán menores, en consecuencia a una menor superficie abarcada. El menor riesgo corresponde a la cuenca 3, la cual recibe aporte de agua en eventos de precipitaciones esporádicas, debido a su menor altitud y extensión.

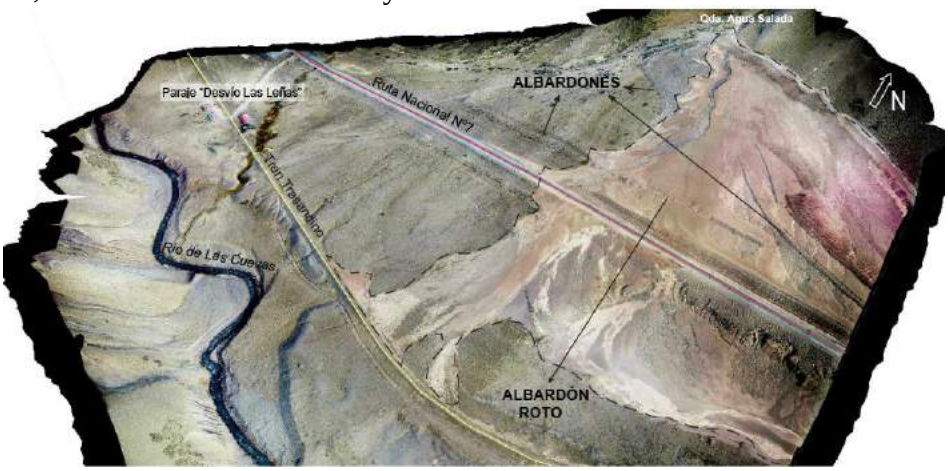


Figura 7. Vista aérea del abanico oriental, capturada en abril de 2019. En línea punteada se delimitó el área afectada por los sucesivos flujos de detritos ocurridos entre 2015 y 2019. Observar como la traza del tren trasandino afectó el recorrido de los flujos hacia el sur.

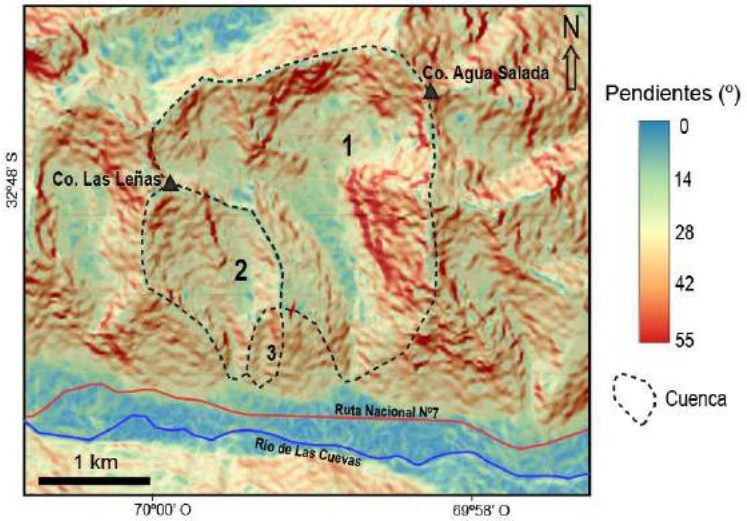


Figura 8. Mapa de pendientes del área de estudio con las cuencas que alimentan cada abanico coluvial.

Según Varnes (1984) las pendientes de las laderas son uno de los factores fundamentales que condicionan la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Moreiras (2009) ha establecido que el ángulo de las pendientes, la altura y la litología son los factores con mayor influencia en la inestabilidad de las laderas para esta zona de los Andes Centrales. La pendiente media de una cuenca es un índice de la velocidad media de la escorrentía y,

por lo tanto, de su poder erosivo (Ibáñez Asensio *et al*., 2011). El mapa de pendientes de la zona permite establecer que en la cuenca 1, que alimenta al abanico coluvial oriental, las zonas poco inclinadas (5 a 10º) corresponden a los glaciares de roca y los sectores superior y medio del lecho del cauce principal, mientras que las zonas con mayores pendientes, en torno a los 55º, corresponden a las laderas norte y oriental. En la cuenca 2, las pendientes toman valores de entre 15º y 50º, y las mayores inclinaciones se encuentran en el sector occidental de la cuenca. Por último, en la cuenca 3 las pendientes son de 30º en promedio (ver Fig. 8).

Medidas estructurales de mitigación

En una evaluación de las medidas de mitigación estructurales llevadas a cabo en los abanicos coluviales, es posible distinguir ciertas ventajas y desventajas de los albardones y los disipadores de energía. Dentro de los rasgos positivos se destacan que no es necesaria la instalación de estructuras fijas, ya que se utiliza el mismo material depositado por los flujos, lo que implica bajos costos económicos, al tiempo que es una medida de resolución rápida de ser implementada. Como rasgos negativos se destaca que en el abanico oriental los albardones no resultaron ser lo suficientemente elevados y resistentes frente al evento ocurrido en 2018-2019, de manera que fueron parcialmente sobrepasados y arrasados.

Análisis del riesgo geológico y consideraciones finales

Actualmente, considerando las 3 cuencas analizadas en el presente trabajo, el abanico coluvial oriental es el que presenta la mayor actividad. Si bien el abanico coluvial occidental sufrió algunos eventos en el pasado, estos no tuvieron gran magnitud y, por ende, no generaron mayores inconvenientes y daños. Los flujos de detritos ocurridos allí, en el caso que alcancen la traza de la ruta, son efectivamente drenados, ya que no implican volúmenes significativos (ver Fig. 9 a). Así, las medidas de mitigación aplicadas en el abanico occidental, correspondientes a albardones y disipadores de energía, resultan desmedidas e innecesarias con respecto a aquellas precisadas en el abanico oriental.

Las medidas de mitigación aplicadas en el abanico coluvial oriental no resultaron efectivas para contener los flujos del evento 2018-2019. Los albardones antrópicos fueron parcialmente erosionados y sobrepasados durante dicho evento, de manera que no pudieron impedir que los flujos se mantengan encauzados y alcancen la traza de la ruta. Los albardones resultaron ineficientes debido a que se construyeron con material depositado por el flujo que tuvo lugar en 2016. De este modo, el segundo evento, de gran potencia, tuvo la capacidad de romper los albardones y removilizar dicho material. A su vez, el drenaje fue colmatado, lo que favoreció el escurrimiento sobre el camino pavimentado (ver Fig. 9 b).

Para mejorar la efectividad de las medidas estructurales existentes se sugiere el mantenimiento habitual de los drenajes, y la inmediata limpieza y vaciado tras la ocurrencia de eventos de remoción en masa. En el caso de los albardones, estos deben ser reconstruidos con mayor espesor y estar conformados por bloques de mayor tamaño. Además, se sugiere la implementación de gaviones dispuestos en paralelo al albardón inmediato al norte de la ruta.

Respecto de las medidas no estructurales de mitigación, un aspecto esencial para evaluar y controlar fenómenos de remoción en masa es el monitoreo. Es necesario llevar registro de las precipitaciones durante los meses estivales e invernales, para establecer con mayor precisión el vínculo entre estas y los eventos de flujos de detritos. Para ello se sugiere poner en funcionamiento las estaciones meteorológicas situadas en Cristo Redentor, Las Cuevas y Plaza de Mulas, las cuales aún no se han activado desde su instalación en 2017.



Figura 9. a. Drenaje del abanico occidental, (quebrada Las Leñas). Fotografía tomada en abril de 2019. **b**. Drenaje parcialmente colmatado del abanico de la quebrada Agua Salada. Fotografía tomada en abril de 2019.

CONCLUSIONES

La zona analizada en este trabajo se encuentra afectada en forma recurrente por flujos de detritos que cortan la Ruta Nacional Nº7. El análisis de los abanicos coluviales involucrados permite establecer una relación entre ciertos parámetros morfométricos de las cuencas que los alimentan y las dimensiones de los flujos generados. La cuenca 1, asociada al abanico oriental, es la que presenta el mayor riesgo a la ocurrencia de flujos de detritos.

La implementación de nuevas medidas de mitigación estructurales y el mejoramiento de aquellas existentes ayudarían a reducir el impacto de los flujos de detritos sobre la Ruta Nacional Nº7. Se sugiere la ampliación de los drenajes en el abanico coluvial oriental y la reconstrucción de albardones utilizando bloques de mayores dimensiones. Además, la instalación de un gavión al norte de la ruta conformaría una medida de protección complementaria. También se enfatiza en el mantenimiento adecuado de las estructuras ya existentes, como es el caso de los drenajes.

Es necesario establecer algún sistema de monitoreo en combinación con sistemas de alerta para que las medidas existentes en la actualidad y las propuestas en este trabajo cumplan con máxima efectividad. Por último, se destaca la importancia de la inclusión de la población local y los entes turísticos y comerciales en el conocimiento y entendimiento de los riesgos a los que se encuentran expuestos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Buenos Aires y a la FCEyN por la financiación recibida mediante los proyectos UBANEX y Exactas con la Sociedad. Además agradecer a los pobladores de las villas andinas, en particular a Fernando Palma y Araceli Pellegrina del paraje “Mundo Perdido” en Penitentes y a Sebastián Tebez en el “Desvío Las Leñas”, por su compromiso, interés y ayuda incondicional brindada en las tareas de campo realizadas.

REFERENCIAS

Cegarra, M., Ramos, V.A. La faja plegada y corrida del Aconcagua. En: Ramos, V.A., et al. (Eds.), Geología de la región del Aconcagua, Prov. de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Buenos Aires. Anales 24 (14), 387–422 (1996).

Cegarra, M. y Ramos, V.A. Cerro Aconcagua: La cumbre más alta de América. En *Sitios de Interés Geológico de la República Argentina*, SEGEMAR, Anales 46: 189-201, Buenos Aires (2008).

Coe, J.A., Kinner, D.A. y Godt, J.W. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado. *Geomorphology* 96(3–4):270–297 (2008).

Crozier, M.J. Field assessment of slope instability. En D. Brunsden y D.B. Prior (eds.) Slope Instability: 103-142, Chichester (1984).

Corte, A. Procesos periglaciares actuales y pasados en Argentina central. I° Reunión Grupo Periglacial, Actas: 63-74, Mendoza (1983).

Delgadillo, A., Ferrer, C. y Dugarte, M. Aspectos hidrogeomorfológicos de un sector de Los Andes merideños (Venezuela): un intento de zonificación por crecidas y flujos de detritos. *Rev. Geogr. Venez*. 50, 59-85 (2009).

Espizua L.E. Pleistocene glaciations in the Mendoza Andes, Argentina. *Quaternary Research*, 40, pp. 150-162 (1993).

Espizua, L.E., Bengoechea, J. y Aguado, C. Mapa de riesgo de remoción en masa en el Valle del río Mendoza. XXII° Congreso Geológico Argentino y II° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas VI: 323-332, Buenos Aires (1993).

Fauqué, L., Hermanns, R., Hewitt, K., Rosas, M., Wilson, C., Baumann, V., Lagorio, S. y Di Tomasso, I. Mega-deslizamientos de la pared sur del cerro Aconcagua y su relación con depósitos asignados a la glaciación pleistocena. *Rev. de la Asoc. Geológica Argentina* 65(4): 691-712 (2009).

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J.M. Morfología de las cuencas hidrológicas. Universidad Politécnica de Valencia, España (2011).

Kean, J.W., McCoy, S.W., Tucker, G.E., Staley, D.M. y Coe J.A. Runoff-generated debris flows: observations and modeling of surge initiation, magnitude, and frequency. *J Geophys Res Earth Surf* 118(4):2190–2207 (2013).

Meza Aliaga, M., Rodríguez, V.A., Corvacho, G.O. y Tapia, T.A. Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la Quebrada de Camuña, Norte Grande de Chile. *Diálogo Andino* (2014).

Moreiras, S.M. Remoción en masa en un sector del valle del Río Mendoza. Mendoza, Argentina. UNLaR Ciencia, Revista Científica de la Universidad Nacional de La Rioja, 2(1), 2–10 (2003).

Moreiras, S. M. Landslides Susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology* 66 345–357 (2005).

Moreiras, S. M. Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina. *Quat Int* 158(1):110–121 (2006).

Moreiras, S.M. Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (4): 780-790 (2009).

Moreiras, S.M. Avances en el estudio geomorfológico de la Quebrada de Matienzo, provincia de Mendoza, Argentina. *Contribuciones Científicas GAEA*, 2, 159–173 (2010).

Norte, F. Mapa climatológico de Mendoza. Inventario de Recursos de la Región Andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo – Provincia de Mendoza (1996).

Ramos, V.A. The tectonics of the Central Andes (30º –33º S). En: Clark, S., Burchfiel, D., Suppe, J. (Eds.), Proc. in Continental Lithospheric Deformation. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, 218, 31–54 (1988).

Santos, J.R., Norte, F., Moreiras, S.M., Araneo, D. y Simonelli, S. Predicción de episodios de precipitación que ocasionan aludes en el área montañosa del noroeste de la provincia de Mendoza, Argentina. *GEOACTA*, 40(1), 65-75 (2015).

Varnes, D.J., Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster & R.J. Krizek (eds), Landslides Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176. National Academy Press, Washington, DC, pp. 11-33 (1978).

Varnes, D. J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Int. Assoc. of Engine. Geology Comm. on Landslides and other mass movements on Slopes. UNESCO, Paris (1984).

Vergara Dal Pont, I.P., Santibañez Ossa, F.A., Araneo, D., Ferrando Acuña, F.J. y Moreiras, S.M. Determination of probabilities for the generation of high-discharge flows in the middle basin of Elqui River, Chile. *Nat Hazards* 93:531–546 (2018).

Viale, M. y Garreaud, R.D. Summer Precipitation Events over the Western Slope of the Subtropical Andes. *Mon. Wea. Rev*, 142, 1074-1092 (2014).

Winocur, D., Benitez, A. y Espíndola, A. Caracterización de los eventos de remoción en masa ocurridos en enero y febrero de 2016 en la Ruta Nacional 7, entre Uspallata y el paso internacional Cristo Redentor, Mendoza. XX Congreso Geológico Argentino (2017).

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES CLOACALES APLICABLE AL REFUGIO SAN MARTÍN

Zárate A.[a], Paz Zalazar R.[b] y D´Amico N. [c]

[a]Universidad Nacional de Río Negro, ARGENTINA
[a,b]Dpto. de Física de Reactores y Radiaciones, Centro Atómico Bariloche,CNEA, ARGENTINA
[a,c]Dpto. Física de Neutrones, Centro Atómico Bariloche, CNEA, ARGENTINA

e-mail: antozarate93@gmail.com

RESUMEN

El Parque Nacional Nahuel Huapi, ubicado al noroeste de la Patagonia Andina Argentina, posee un sistema de refugios de montaña, conformado por bienes patrimoniales naturales y culturales, de alto valor inmaterial y paisajístico. Los refugios se ubican en un sitio de fragilidad ambiental ya que están asociados a arroyos y lagunas de altura o glaciares y arroyos. El refugio San Martín, ubicado en la ciudad de Bariloche, se encuentra próximo a un mallín de alta montaña y, en los últimos años, ha presentado un marcado incremento en el número de visitantes. El objetivo del trabajo de investigación fue evaluar y proponer mejoras para minimizar el impacto negativo producto de la descarga de efluentes cloacales provenientes de los baños externos del refugio. Para ello se realizaron distintos relevamientos donde se diagnosticó el sistema de tratamiento. Se pudo constatar que dichos efluentes son vertidos a un mallín de altura que, debido a la saturación del sistema, poseen un tratamiento altamente deficiente, constituyendo así un riesgo ambiental significativo. El mallín se encuentra próximo a la zona de acampe, incrementando la exposición de los visitantes. Los mallines altoandinos se encuentran bajo condiciones ambientales rigurosas, dificultando su proceso de recuperación. Se desarrolló un análisis de distintas tecnologías de sistemas de tratamiento aplicables al sitio, realizando visitas a campo a otros refugios de la zona, entrevistas y relevamiento bibliográfico. También se analizó las tecnologías, considerando aspectos sociales, económicos y ambientales. Como conclusión del estudio se obtuvo que el sistema de tratamiento de efluentes cloacales aplicando baños secos permite reducir significativamente el riesgo ambiental, considerando su alta eficiencia bajo condiciones climáticas extremas y la eliminación de la descarga de efluentes al entorno. Se considera esta tecnología altamente recomendable dado que es amigable con el ambiente, de fácil aplicación y mantenimiento y se adapta al ambiente de montaña.

Palabras Clave: Ambiente, Montaña, Refugio, Efluente, Mallín.

INTRODUCCIÓN

El senderismo en el Parque Nacional Nacional Nahuel Huapi (PNNH) es una actividad creciente, cuenta con una importante red de sendas habilitadas y una serie de refugios de montaña, los cuales se encuentran administrados por el Club Andino Bariloche (CAB) (Parque Nacional Nahuel Huapi, 2018). Las caminatas hacia y entre ellos son una clásica travesía para la comunidad local, un producto buscado por los turistas y una meta para los montañistas; además conforman referentes icónicos de un sistema socio-territorial (Skavarca et al, 2010).

El sistema de refugios de montaña se desarrolla en un sitio de fragilidad ambiental y alto valor paisajístico del PNNH. Estos refugios fueron dimensionados para brindar servicio a un número determinado de personas, el cual actualmente se encuentra excedido. En algunos

de ellos no existen sistemas de tratamiento de efluentes o los mismos se encuentran subdimensionados (PNNH, 2018). En la mayoría de los casos, parte del agua residual finaliza, prácticamente sin tratamiento, en los cuerpos de agua y/o glaciares. Estos vertidos drenan aguas abajo y, por lo tanto, resulta ser uno de los problemas más graves en algunas altas cuencas (PNNH, 2018).
El número de visitantes que acceden a los refugios de montaña ha registrado un importante incremento en los últimos años. Este aumento en la demanda trae aparejado un incremento de problemáticas de conservación y manejo en el área de implementación de los refugios, áreas colindantes y en la red de senderos (PNNH, 2018).
El refugio San Martín es uno de éstos, el cual se ubica en la zona sur del PNNH (ver Fig.1), en el macizo del C° Catedral. Se puede acceder al mismo por distintos caminos de montaña.

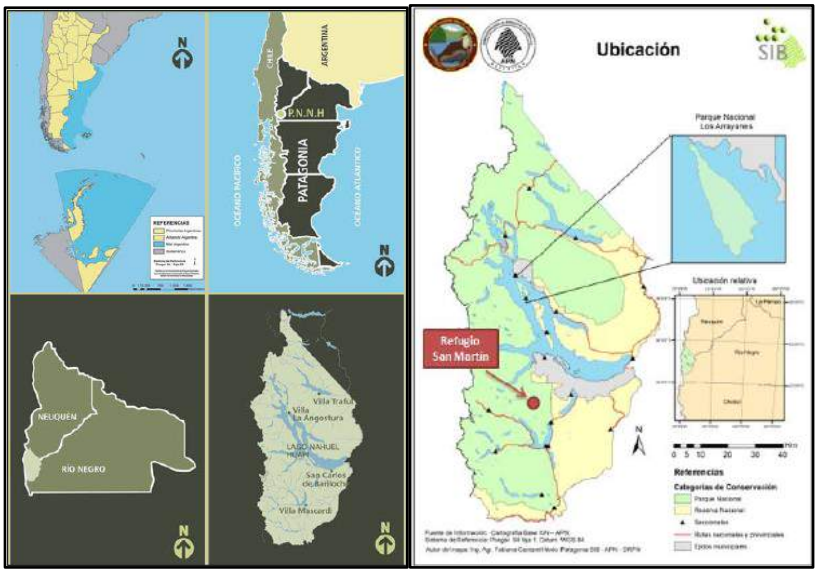


Figura 1. Ubicación geográfica del PNNH y el refugio San Martín. **Fuente**:PNNH, 2018.

El mismo se ubica a orillas del lago Jakob (ver Fig. 2a), sobre el margen norte, a 1564 msnm, cuyo ambiente es de alta montaña. Las precipitaciones en la región ocurren en un 46% del total anual durante el invierno, mientras que en el otoño se acumula el 27% (PNNH, 2018). El período estival corresponde a la etapa más seca del año.
La información disponible sobre precipitación nívea es escasa e incompleta en la zona, debido a la ausencia de registros meteorológicos en sitios de alta montaña. La estación meteorológica del C° Catedral, ubicada a 2000 msnm, es representativa de la zona de alta montaña y registra una temperatura media anual de 2,1°C. La temperatura media del mes más cálido (enero) es de 8,0°C; y las temperaturas medias del mes más frío (julio) alcanzan los -2,6°C (PNNH, 2018). Estos datos fueron obtenidos durante el período de años de 1961-1970 y 1981-1990. El refugio se ubica aproximadamente a 7,5 km de la cumbre del C° Catedral en línea recta (valor estimado en Google Earth). Es importante destacar que, si bien no se tienen registros de precipitaciones níveas, la zona en donde se encuentra el refugio es un sitio que recibe fuertes nevadas, alcanzando valores aproximados de hasta más 2 m de altura de nieve, pudiendo superar dichos valores en algunos inviernos muy fríos.
Su inauguración fue en el año 1952, por lo que lleva 68 años en actividad. Brinda sus servicios al público durante todo el año, con una capacidad actual de pernocte de aproximadamente 60 personas. Además cuenta con una zona de acampe, por lo que el número de visitantes no solo se limita a la capacidad del refugio. El mismo cuenta con baños internos y externos, ubicándose estos últimos (ver Fig. 2b) aproximadamente a unos

85 m del refugio en dirección noroeste del mismo, los cuales se hallan en funcionamiento hace más de 15 años.



Figura 2a. Refugio San Martín. **b**. Baños externos.
Fuente:Refugio San Martín (s.f).

El presente trabajo se centra sobre dichos baños externos ya que son utilizados con mayor frecuencia que los baños internos, siendo estos últimos reservados principalmente para el personal. Durante los meses de diciembre a mayo inclusive (a partir de aquí considerados como meses de temporada), el refugio recibe el mayor número de visitantes, siendo aproximadamente un 90% del total anual. Las personas, ya sean acampantes o que realizan pernocte en el refugio, deben utilizar los baños externos en dicha temporada.

Previo al actual sistema de tratamiento de efluentes cloacales, se utilizaba un sistema de letrinas. En la actualidad dichos efluentes son vertidos, luego de un tratamiento previo en cámara séptica (CS), a un mallín ubicado a escasos metros de la generación de los mismos.

Los mallines altoandinos de la Patagonia son un tipo de humedal, generalmente de escasas dimensiones, localizado en una formación geológica que contiene un acuífero freático cercano. Este último es una fuente de agua que humidifica el suelo a partir del ascenso capilar, proceso facilitado por las características del mismo, generalmente con altos contenidos de cenizas volcánicas (De Ecuador, G., 2008) (Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA, 2008). Estos humedales mantienen una diversidad biológica única y se caracterizan por un alto nivel de endemismo de flora y fauna. En la cordillera se encuentran bajo condiciones ambientales rigurosas, permanecen varios meses cubiertos por nieve y la estación de crecimiento de las plantas es corta (Raffaele, E., 1999). Son sistemas frágiles por ser de fácil degradación tanto antrópica como natural, impactando así en todo el sistema hidrológico (De Ecuador, G., 2008). Además son altamente vulnerables, particularmente frente a las presiones del desarrollo basadas en prácticas no sostenibles (Convención de Ramsar, 2008).

Los baños externos del refugio San Martín generan como efluente cloacal aguas negras, las cuales transportan heces y orina provenientes de los inodoros, y aguas grises, las cuales son aguas jabonosas provenientes de los lavamanos. Estos efluentes generados son considerados aguas residuales domésticas (ARD), las cuales presentan diversas características físicas, químicas y biológicas. En lo que respecta a las características químicas, se destacan la materia orgánica e inorgánica. La materia orgánica es la fracción más relevante de los elementos contaminantes en las aguas residuales debido a que es la causante del agotamiento de oxígeno molecular (O_2) de los cuerpos de agua. La urea, principal constituyente de la orina, es también un importante compuesto orgánico de las ARD. Ésta, debido a su rápida descomposición, raramente es hallada en las aguas residuales, salvo que su presencia sea muy reciente (Metcalf and Eddy, 1985). Entre los elementos presentes dentro de la materia inorgánica se destacan principalmente el nitrógeno (N) y fósforo (F), los cuales pueden provocar un disturbio en el ambiente si son

incorporados al mismo de una forma tal que altere las condiciones naturales del medio. Su exceso puede causar procesos de contaminación severos, como la eutrofización.
Las características biológicas de las ARD se refieren principalmente al contenido de un gran número de microorganismos vivos, dentro de los cuales se encuentran los denominados "benéficos" para el tratamiento de aguas residuales ya que crecen utilizando los contaminantes de las mismas como fuente de carbono (C) y/o como fuente de energía, convirtiéndolos en nuevos microorganismos (biomasa), dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos inocuos. Además de organismos benéficos, también se encuentran presentes organismos considerados patógenos para el ser humano. Los principales grupos que pueden encontrarse incluyen a bacterias, virus, protozoarios y helmintos (Valdez E. and Vázquez A., 2003). Estos organismos pueden proceder de heces humanas que estén infectadas o que sean portadores de una enfermedad determinada. Debido a esto las aguas residuales son una ruta potencial de transmisión de enfermedades cuando las mismas son descargadas sin un correcto tratamiento al ambiente. Es importante destacar que si la mayoría de dichos constituyentes no son removidos o tratados, confieren a las aguas residuales la característica de ser aguas no tratadas o parcialmente tratadas.
La ausencia de tratamientos de efluentes cloacales o una ineficiencia de éstos trae aparejado serios problemas, tanto al ambiente como a la salud de las personas. Se estima que una persona excreta 550 l anuales, de los cuales 500 l corresponde a orina y 50 l a heces (Fernández Curutchet. M et al, 2015). Esto permite dimensionar el volumen de generación de efluentes cloacales, los cuales son una potencial ruta de transmisión de microorganismos patógenos para el ser humano.
Se pueden destacar tres efectos principales del vertido de aguas sin tratar o parcialmente tratadas; ellos son efectos adversos sobre la salud humana, impactos ambientales negativos y posibles efectos en las actividades económicas (Water, U., 2017). Los peligros[1] para la salud pública se presentan debido a la mala contención de las aguas residuales, las fugas durante el vaciado y el transporte, y el tratamiento ineficaz de las mismas. Esto conlleva a una mayor exposición a los peligros microbianos causados por las excretas humanas. El vertido de aguas residuales no tratadas o incorrectamente tratadas en el ambiente tiene un impacto en la calidad del medio al cual son arrojadas. La gestión inadecuada de los efluentes también tiene un impacto directo en los ecosistemas y los servicios que prestan. Algunas de las consecuencias que se producen en el ambiente es el crecimiento acelerado de bacterias en el sitio de descarga, lo cual es una respuesta a suministros ricos en nutrientes provenientes de dicho vertido. La disminución del oxígeno disuelto y la formación de depósitos de lodos pueden considerarse como la perturbación ambiental más importante que puede afectar al medio acuático (Ramalho R.S., 1996). Los ecosistemas naturales pueden resultar muy eficaces y económicos al ofrecer servicios de tratamiento de aguas residuales, siempre que se trate de ecosistemas saludables, en los que se regulen la carga y los tipos de contaminantes presentes en los efluentes y que no se supere la capacidad de transporte de contaminantes del ecosistema (Water, U., 2017). La capacidad de asimilación del ambiente tiene límites naturales, cuando estos se superan, los ecosistemas están en peligro y no pueden continuar cumpliendo la función de depuración. Una vez que la concentración de contaminantes alcanza los umbrales críticos, existe el riesgo de que se produzca un cambio ambiental abrupto e irreversible. El agua contaminada puede afectar directamente a las actividades que utilizan el agua, destacándose en este caso principalmente el turismo (Water, U., 2017).

[1] Peligro: se refiere a un componente biológico, químico o físico que puede causar daño a la salud humana (Guías para el saneamiento y la salud, 2019).

El objetivo del trabajo fue evaluar y proponer mejoras para minimizar el impacto negativo producto de la descarga de efluentes cloacales provenientes de los baños externos, ubicados en el refugio San Martín.

METODOLOGÍA

Se realizaron visitas al refugio San Martín para relevar el estado del sistema de tratamiento de efluentes de los baños externos. A continuación (ver Tabla I), se presentan las fechas de las visitas.

Tabla I. Fecha de las visitas al refugio San Martín.

1°VISITA	2° VISITA	3° VISITA	4° VISITA	5° VISITA	6° VISITA	7° VISITA
09/05/19	26/05/19	08/11/19	08/12/19	20/01/20	02/02/20	23/02/20

Se llevó a cabo un incremento de visitas entre noviembre y febrero, correspondiente a la etapa estival, en la cual el refugio recibe el mayor número de visitantes y con ello el aumento en el uso de los baños externos. No se realizaron visitas durante la etapa invernal del año 2019, ya que en dicho período los baños externos no estuvieron en funcionamiento.
Teniendo en cuenta lo observado en las distintas visitas, se llevó a cabo un relevamiento bibliográfico de distintas tecnologías de sistemas de saneamiento[2] con potencial de ser aplicables al sitio. Luego se realizó un análisis de 4 sistemas de saneamiento considerados con mayor aptitud para implementar en el refugio San Martín, con una proyección de uso a 10 años. Para ello se llevó a cabo el dimensionamiento de los 4 sistemas. Se solicitó información al PNNH de los registros de *trekking*[3] de los visitantes. Dicho registro lo debe realizar el visitante en la página web del PNNH cada vez que visite el refugio. Según un estudio realizado por el mismo PNNH (PNH, 2020) en los meses de enero y febrero del año 2020, en dos de los refugios más cercanos al refugio San Martín, un 64% de los visitantes no se registra, por lo que los datos suministrados por el Parque fueron corregidos teniendo en cuenta dicho porcentaje.
De los 4 sistemas de tratamiento dimensionados, 2 de ellos fueron con tecnología de arrastre hidráulico y los 2 restantes con sistema de baño seco. Debido a esto, se realizó una proyección de generación de efluentes y de generación de excretas, a 10 años, utilizando como referencia los datos suministrados por el PNNH con la corrección del 64% mencionada. Para ello se optó por utilizar la función “tendencia” en el programa de hoja de cálculo ofrecido por libre office. Esta fórmula considera los datos parciales de una tendencia lineal, para luego calcular una tendencia lineal ideal mediante el método de mínimos cuadrados. Para la proyección de efluentes se consideró el mes donde ocurre la mayor generación de los mismos, correspondiente al mes de enero. Para la proyección de excretas se optó por considerar los meses en donde funcionan los baños externos, correspondiente a los meses de temporada, correspondiendo así al período de diciembre a mayo inclusive.
Una vez realizado el dimensionamiento de cada sistema se llevó a cabo un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) para, de este modo, obtener el sistema óptimo a implementar, teniendo en cuenta además aspectos sociales, ambientales y económicos. Dicha metodología es adaptada de Bergara R.A., 2019 la cual consiste en realizar un análisis FODA con valoración numérica a cada uno de los aspectos

[2] Sistema de saneamiento: se compone del sistema de tratamiento de las aguas residuales más el sistema de interfase con el usuario, conocido comúnmente como sanitario o inodoro.
[3] *Trekking:* también llamado senderismo, se refiere a la actividad de realizar caminatas en un entorno natural o abierto.

seleccionados. Se realizó una valoración numérica con valores positivos a las fortalezas y oportunidades consideradas y con valores numéricos negativos a las debilidades y amenazas (ver Tabla II).

Tabla II. Valoración de aspectos en el análisis FODA.

FACTORES	VALORACIÓN SUBJETIVA	VALORACIÓN NUMÉRICA
NEGATIVOS (debilidades y amenazas)	alto	-6 y -5
	medio	-4 y -3
	bajo	-2 y -1
POSITIVOS (fortalezas y oportunidades)	bajo	1 y 2
	medio	3 y 4
	alto	5 y 6

Los aspectos considerados comunes entre los 4 sistemas de tratamientos, los cuales posteriormente fueron valorados, fueron los siguientes:

Factores positivos

Fortalezas (interno)

- *Disponibilidad*: la facilidad con la que se pueden adquirir los insumos para poner el funcionamiento del sistema.
- *Eficacia:* es la capacidad de lograr el objetivo deseado.
- *Vida útil del sistema:* relacionado a la durabilidad de la tecnología en años.
- *Instalación del sistema:* facilidad de instalación del sistema y la puesta a punto del mismo.

Oportunidades (externo)

- *Beneficio ambiental:* se refiere a la mejora ambiental del entorno afectado así como también la preservación del entorno a lo largo del tiempo.
- *Aprovechamiento de la infraestructura del sistema actual:* posibilidad de utilización del sistema de tratamiento actualmente.
- *Beneficios indirectos:* relacionado a la posibilidad de tratar los efluentes hoy presentes en las CS y la adecuación o no de los usuarios al sistema, así como también la formación de conciencia ambiental en los usuarios.
- *Aprovechamiento de recursos materiales presentes en el sitio:* aprovechar los recursos del sitio disminuye los gastos y la necesidad de recurso humano para su transporte hacia el refugio.

Aspectos negativos

Debilidades (interno)

- *Costo inicial:* se refiere a la inversión inicial necesaria para la construcción e implantación de la alternativa elegida.
- *Recursos económicos para el mantenimiento del sistema:* gastos económicos necesarios para las operaciones, luego de la puesta en funcionamiento del sistema.

- *Recurso humano para el mantenimiento del sistema:* necesidad o no de personal capacitado para el mantenimiento del sistema.
- *Gestión de los lodos:* relacionado a la necesidad de llevar a cabo un tratamiento de los lodos producidos durante el proceso de tratamiento.
- *Monitoreo:* aspecto relacionado a la necesidad de realizar monitoreos periódicos para constatar la eficiencia del sistema.

Amenazas (externo)

- *Riesgos asociados a la sanidad del personal y usuarios:* presencia de riesgos durante la implantación y/o desarrollo de la alternativa elegida.
- *Condiciones climáticas del ambiente de alta montaña:* condiciones que podrían ser consideradas adversas o desfavorables para el desarrollo del sistema de tratamiento.
- *Accesibilidad al sitio:* se refiere a la dificultad de acceso al sitio.
- *Falla eléctrica:* riesgo asociado principalmente a alguna falla en la turbina de generación eléctrica, la cual es la única fuente de generación eléctrica en el sitio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de los relevamientos realizados en los baños externos del refugio San Martín se pudo evidenciar que el sistema cuenta con 2 CS, cuya descarga de los efluentes es a un mallín de altura (ver Fig. 3). Dichas cámaras reciben el efluente generado de 4 inodoros, y 2 lavatorios. En el rectángulo rojo de la Fig.3 se representa una zanja que fue construida para direccionar el efluente proveniente de las cámaras hacia ese sitio y lograr su contención e infiltración únicamente en esa zona, evitando así que el mismo se distribuya por todo el mallín. A lo largo de los distintos relevamientos ambas CS se encontraron llenas, y el mallín con una abundante presencia de lodo fecal y efluente (ver Fig. 4a), producto del desborde continuo de la zanja. También, en el interior del mallín, se observó la presencia de una carpa (ver Fig. 4b).

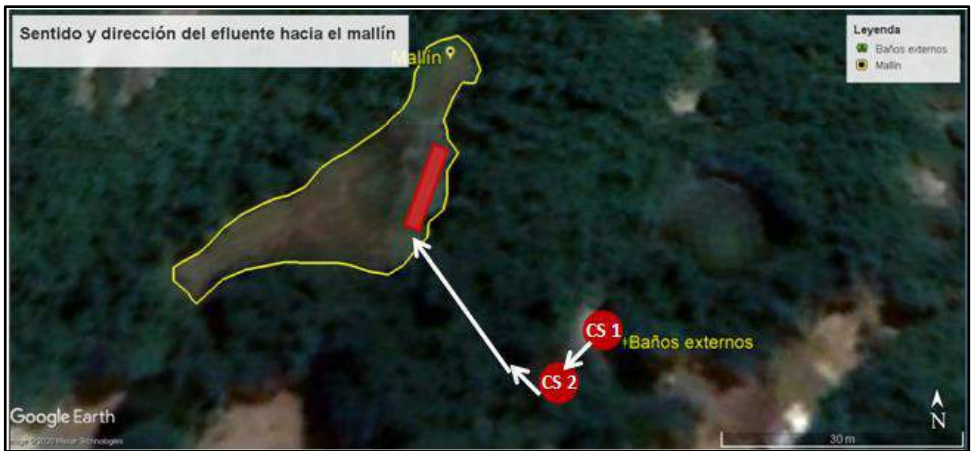


Figura 3. Sentido y dirección del efluente hacia el mallín.

Se pudo detectar una abundante presencia de excremento equino en el mallín (ver Fig. 5a y 5b), así como también un curso de agua contiguo al mismo (ver Fig. 5c), el cual presentaba posibles señales de eutrofización, debido a la coloración verdosa de sus aguas. No se pudo detectar el destino final de dicho curso, pero sí de la posible propagación de la contaminación por fuera de las inmediaciones de la zona mallinosa.

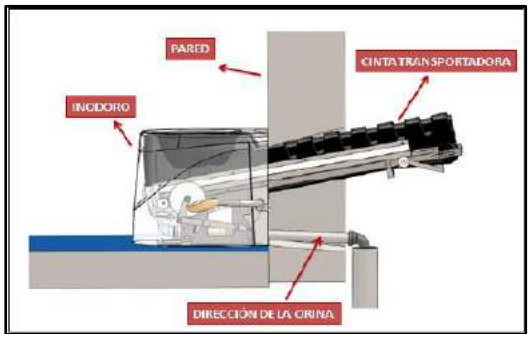


Figura 4a. Refugio San Martín. **b**. Baños externos.



Figura 5a y b. Excremento equino sobre el mallín. **c.** Curso de agua contiguo al mallín.

Entre las distintas tecnologías relevadas de forma bibliográfica, se destacaron aquellas que requieren agua para su funcionamiento, es decir tecnologías con arrastre hidráulico, y aquellas que no. Dentro de las tecnologías de arrastre hidráulico se destacan en este trabajo: inodoro de arrastre hidráulico y tratamiento con tanque séptico o biodigestor e inodoro de arrastre hidráulico y tratamiento aeróbico con ozono. En cuanto a las tecnologías sin uso de agua se destacan: inodoro seco con separación de orina y tratamiento in situ en cámara de compostaje e inodoro seco con separación de orina con el sistema ECODOMEO. En el caso de las tecnologías sin uso de agua, se hace énfasis en que, en el caso de la primera, la separación de las heces de la orina ocurre en la taza del inodoro, y es realizada por el usuario. En el caso de la tecnología ECODOMEO (Ecodomeo, s.f), la separación ocurre por debajo de la taza, es decir el usuario no realiza dicha separación. Este sistema consiste en una cinta transportadora, la cual se ubica por debajo del inodoro. Sobre dicha cinta caen las excretas humanas, la orina escurre por la cinta depositandose en la parte inferior, la cual luego puede ser direccionada a un terreno de infiltración. Las heces permanecen en la cinta, al accionar el pedal esta última se desplaza depositando los sólidos en un contenedor (ver Fig. 6a y b). Esta tecnología es utilizada en varios refugios de Europa, Canadá y Estados Unidos, así como también en Chile, más precisamente en el Parque Nacional Torres del Paine.



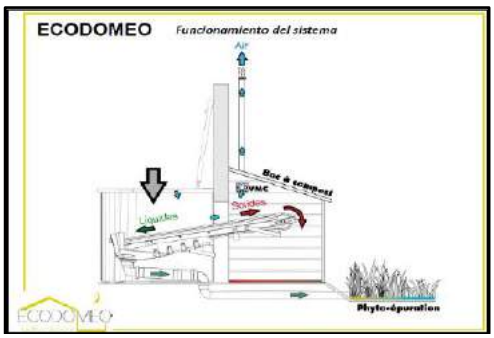


Figura 6a. Distintos compartimentos del sistema ECODOMEO **b**. Funcionamiento del sistema ECODOMEO.

Se estudiaron diversas experiencias realizadas en ambientes similares al refugio San Martín, destacándose el estudio llevado a cabo por Hill G.B., 2013, donde se realizó un análisis de tratamiento y gestión de los desechos humanos en sitios remotos de entre 50 y 2200 msnm, de una amplia variedad de condiciones climáticas de América del Norte, Suiza y Francia. El mismo concluye en que los baños secos con separación de orina y sistema de lombricompostaje como tratamiento de heces resulta tener un mecanismo de reducción considerable de patógenos y de masa, bajos costos anuales de operación y mantenimiento, los riesgos operacionales son mínimos, no requiere agente de carga, reduce los productos finales al 41% de la masa seca de materia prima inicial de excrementos y produce un producto final maduro con pH neutro, todo esto incluso cuando el sólido se encuentra expuesto a bajas temperaturas, en comparación a sistemas de tratamiento tipo letrinas.

A continuación (ver Tabla III), se presentan los números de los visitantes al refugio San Martín a lo largo de los últimos 10 años. El refugio sufrió un incendio en el año 2017 con pérdidas prácticamente totales, en dicho siniestro no se vieron afectados los baños externos. En el período 2017-2018, mientras se realizaba la construcción del nuevo refugio, el número de visitantes fue menor.

Tabla III. Personas registradas por el PNNH, que visitaron el refugio San Martín.

PERSONAS REGISTRADAS POR EL PNNH, QUE VISITARON EL REFUGIO SAN MARTÍN, CONSIDERANDO EL 64% DE PERSONAS NO REGISTRADAS DURANTE EL PERÍODO 2010-2019										
Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017*	2018*	2019
N° Personas	2740	2432	1934	3050	2727	Sin datos	4858	4835	4261	6263
* años afectados por el incendio.										

Con los valores obtenidos de la Tabla III se realizó la proyección de efluentes, dando como resultado estimado que para el año 2030 subirán un total de 3500 visitantes en el mes de enero, por lo que será necesario tratar el volumen generado por dichos visitantes. El cálculo del volumen dió como resultado una generación diaria aproximada de 6000 l de efluentes cloacales.

La proyección de excretas dió como resultado una estimación de visitantes al año 2030 de 8800 personas, en el período de diciembre a mayo inclusive.

Las tecnologías dimensionadas con arrastre hidráulico fueron:

➢ *ampliación del sistema de tratamiento actual agregando biodigestores,* como el sistema actual se encuentra subdimensionado, y debido a que las proyecciones realizadas

muestran que la cantidad de visitantes irá en aumento, es necesario adicionar al sistema de tratamiento actual biodigestores con una capacidad de 4000 l. El terreno de infiltración necesario es de aproximadamente 60 m^2 a 120 m^2, dependiendo el tipo de autor.

- *reemplazo del sistema actual por tratamiento aeróbico con ozono,* el mismo consiste en un biodigestor como primera etapa de tratamiento, luego el tratamiento aeróbico utilizando ozonización, y finalmente un sedimentador. Las CS hoy presentes deberán ser removidas. El terreno de infiltración necesario es de aproximadamente 60 m^2 a 120 m^2, igual al sistema anterior ya que se genera el mismo volumen de efluente, el cual requiere ser infiltrado posterior al tratamiento.

- *Sistema de tratamiento de efluentes con sistema de baño seco y cámara de lombricompostaje,* para su implementación se deberá realizar un reemplazo de los inodoros actualmente presentes. Para realizar el tratamiento de las heces se deberá implementar un sistema nuevo realizando la construcción de lombricomposteras; para el tratamiento de orina y aguas grises se puede continuar manteniendo el sistema de tratamiento actual, siempre considerando que las CS se encuentren en perfecto estado. De acuerdo al cálculo realizado, se obtienen aproximadamente 4180 kg de heces, papel higiénico y material de cobertura por temporada, por lo tanto, será necesario contar con composteras que cubran un total de aproximadamente 4,2 m^3. Se podrían realizar 4 composteras de 1 m^3 cada una. En cuanto a la orina y aguas grises, se obtuvo un total de aproximadamente 2000 l de generación máxima a tratar. Debido a esto el área necesaria para su infiltración es de aproximadamente 20 m^2 a 40 m^2, dependiendo del tipo de autor, y por consiguiente de metodología que se utilice.

- *sistema de baño seco ECODOMEO,* para su implementación se deberá realizar un reemplazo de los inodoros actualmente presentes por el sistema ECODOMEO. Las heces pueden ser tratadas mediante compostaje y/o vermicompostaje. No se necesita agente de carga, solo es necesario mantener la humedad de la pila de sólidos. Se sugiere utilizar lombricompostaje ya que, según investigaciones realizadas, hubieron mayores ocasiones en donde éste fue más efectivo en comparación al compostaje, presentando una alta remoción de patógenos, además de demandar un menor control de variables. Para realizar el vermicompostaje se deberá efectuar la construcción del contenedor de los desechos sólidos. Aquí el dimensionamiento de las composteras es diferente al sistema anterior, ya que no se agrega material de cobertura y, según los datos del fabricante y teniendo en cuenta la generación de excretas por persona y las proyecciones realizadas, se requerirán 2 composteras, cuyo tamaño sería aproximadamente de 0,4 m^3. Para el tratamiento de orina y aguas grises se puede continuar manteniendo el sistema de tratamiento actual y en cuanto al lecho de infiltración, el área necesaria es de aproximadamente 20 m^2 a 40 m^2, dependiendo del tipo de autor, y por consiguiente de metodología que se utilice.

A continuación (ver Tabla IV), se presentan los resultados del análisis FODA para cada sistema de tratamiento dimensionado.
Como resultado se obtuvo que aquellas tecnologías basadas en un saneamiento donde se utiliza agua, como en este caso lo fueron las tecnologías de biodigestores y de ozonización, son las menos aptas de las 4 tecnologías analizadas, para aplicar en los baños externos del refugio San Martín.

Tabla IV. Resultados numéricos del análisis FODA.

	NUEVOS BIODIGESTORES	SISTEMA CON OZONIZACIÓN	BAÑOS SECOS	BAÑOS SECOS ECODOMEO
F	15	19	16	13
O	16	17	19	20
D	-16	-20	-18	-16
A	-12	-12	-10	-8
TOTAL	**3**	**4**	**7**	**9**

CONCLUSIÓN

En los relevamientos realizados en la zona en donde se ubica el sistema de tratamiento de efluentes cloacales de los baños externos del refugio San Martín, se pudo detectar que el sistema actual se encuentra desbordado en su capacidad de tratamiento. El mismo no está realizando de forma efectiva el tratamiento de los efluentes cloacales y la zona de descarga de dichos efluentes se encuentra impactada negativamente.

Tras el análisis FODA realizado, se destaca que los sistemas de saneamiento seco resultaron los óptimos para un ambiente de montaña, presentando una mínima diferencia en los resultados entre el sistema de saneamiento seco con separación desde la taza y el propuesto con la tecnología ECODOMEO, con separación por debajo de la misma. La poca variabilidad de los resultados entre ambas tecnologías de saneamiento en seco muestra que podrían implementarse ambas en los baños externos del refugio San Martín. Se propone como primera opción el sistema con la tecnología ECODOMEO ya que requiere menor adecuación por parte del usuario, así como un menor mantenimiento, en relación a la tecnología de baño seco con separación desde la taza. Continuando con la primera opción, aquí se propone realizar un contenedor de sólidos con material aislante adecuado y de una estructura rígida, la cual sea capaz de soportar las fuertes nevadas de la zona y, de este modo, garantizar la supervivencia de las lombrices. Tener en cuenta esto último es crucial para garantizar el tratamiento de los sólidos mediante el lombricompostaje.

Si bien la tecnología de baño seco con separación desde la taza se propone como segunda opción ya que requiere mayor compromiso del personal del refugio y usuarios, se destaca que estas tareas igualmente pueden ser cumplidas teniendo como premisa el cuidado del ambiente, el entorno del refugio San Martín y su preservación. Estos sistemas de saneamiento seco permitirán reducir ampliamente la descarga de efluentes al mallín, y con esto reducir el riesgo ambiental, teniendo en cuenta que además se observó la presencia de una carpa dentro del mismo mallín, y excremento equino, por lo que los caballos pueden ser agentes dispersores de los patógenos al entrar en contacto con el lodo y/o efluente fecal presente. Debido a esto es necesario que se restrinja el sitio para así evitar la exposición de los acampantes y/o visitantes. Se recomienda la remoción de los lodos en su superficie para permitir su recuperación natural.

El refugio San Martín se encuentra dentro de un sitio de condiciones climáticas rigurosas, como es el caso de un ambiente de alta montaña. Según las estimaciones realizadas la cantidad de visitantes a lo largo de los años sufrirá en aumento. Es importante que se tenga en cuenta ambos aspectos a la hora de implementar un nuevo sistema. El impacto negativo hacia el mallín de altura es importante, por lo que no se debe continuar descargando efluentes cloacales allí.

Es indispensable que se incrementen las inspecciones por parte del organismo de control en el área, para constatar el buen funcionamiento del sistema. Además se debe destacar la realización de capacitaciones hacia el personal del refugio, en lo que respecta al mantenimiento del sistema de tratamiento.

Es necesario un accionar conjunto entre los distintos actores que tienen injerencia sobre el sitio, en este caso entre el PNNH, Club Andino y los concesionarios, teniendo como principal premisa el cuidado del ambiente y la preservación del mismo, dado el sitio en donde se encuentra el refugio. Se debe buscar el equilibrio entre la utilización del área para fines turísticos y recreativos, así como económicos, sin alterar la armonía natural del ambiente.

REFERENCIAS

Bergara, R. A. (2019). Mejora del sistema de tratamiento cloacal de la ciudad de Colón Entre Ríos (Trabajo Final Especialización). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Argentina.

Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA. (2008). Estrategia Regional para la Conservación y Uso Sostenible de Humedales Altoandinos. Gobiernos de Ecuador y Chile,CONDESAN y TNC-Chile.

De Ecuador, G. (2008). Estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos: Agua, vida, futuro. Secretaría de la Convención de Ramsar.

Fernandez Curutchet,M; Hock,D; Dabbah,F & Hernán E. 2015. Sistemas de saneamiento seco, baño seco. 1 a ed. Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, 2015. 142p.

Guías para el saneamiento y la salud [Guidelines on sanitation and health]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2019. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Hill, G. B. (2013). An evaluation of waterless human waste management systems at North American public remote sites (Doctoral dissertation). University of British Columbia, Canadá.

Parque Nacional Nahuel Huapi. Extraído de: https://www.nahuelhuapi.gov.ar/. Fecha de acceso: 29/03/20.

Parque Nacional Nahuel Huapi (2018). Plan de Gestión del Parque Nacional Nahuel Huapi. Parte I – Introducción, Caracterización y Diagnóstico. IF-2019-00195964-APN-DRPN#APNAC

Parque Nacional Nahuel Huapi (2020). Informe de resultados del primer muestreo de tránsito de senderos en la red troncal del Parque Nacional Nahuel Huapi: vías de acceso al refugio Frey. IF-2020-37491754-APN-DGA#APNAC.

Raffaele, E. (1999). Mallines: aspectos generales y problemas particulares. Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. ORCYT, Montevideo, Uruguay.

Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Faculty of Science and Engineering. Laval University. Quebec, Canadá. Reverté.

Refugio San Martín. Extraído de: https://www.refugiojakob.com.ar. Fecha de acceso: 05/05/2019.

Tecnología ECODOMEO. Extraído de http://www.ecodomeo.com/. Fecha de acceso: 23/07/2020.

Skavarca, V., Perucci, L. & Córdoba, V. (2010). El Sistema de Refugios de Montaña en el Parque Nacional Nahuel Huapi: aportes para el desarrollo sustentable de Bariloche (Argentina). Labor & Engenho, 4(4), 25-45.

Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA, AC México DF México.

WATER, U. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Francia: UNESCO.



ISBN 978-987-1323-66-1

UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

ices
CENTRO INTERNACIONAL PARA ESTUDIOS DE LA TIERRA

CNEA
Comisión Nacional
de Energía Atómica