ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS DEL

E-ICES 18



DECIMOCTAVO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Centro de Convenciones Thesaurus
Malargüe, Mendoza, Argentina

21 al 24 de noviembre de 2023

ISBN 978-987-1323-91-3

ices
CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Nodo ARGENTINA

CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica

ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS

DEL

E-ICES 18

DECIMOCTAVO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Centro de Convenciones Thesaurus

Malargüe, MENDOZA

21 al 24 de noviembre de 2023

UNCUYO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

ices
CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Nodo ARGENTINA

CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica

Comisión Nacional de Energía Atómica
Actas de Trabajos Completos del E-ICES 18 : Decimoctavo Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra ; Compilación de Martin Pedro Gómez ; Dino Alberto Filipussi ; María Florencia Lenzano ; Coordinación general de Martin Pedro Gómez ; Director Martin Pedro Gómez ; Luis Lenzano ; Editado por Martin Pedro Gómez ; Dino Alberto Filipussi ; Fotografías de Martin Pedro Gómez ; Prólogo de Martin Pedro Gómez. - 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2025.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-1323-91-3

1. Medio Ambiente. 2. Geografía. 3. Suelo Volcánico. I. Gómez, Martin Pedro, comp. II. Filipussi, Dino Alberto, comp. III. Lenzano, María Florencia, comp. IV. Gómez, Martin Pedro, coord. V. Gómez, Martin Pedro, dir. VI. Lenzano, Luis, dir. VII. Gómez, Martin Pedro, ed. VIII. Filipussi, Dino Alberto, ed. IX. Gómez, Martin Pedro, fot. X. Gómez, Martin Pedro, prolog.
CDD 551.01



COMPILADORES

Dino Filipussi, Florencia Lenzano, y Martín Gómez

EDITORES

Martín Gómez y Dino Filipussi

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN 978-987-1323-91-3

© CNEA 2025

AUTORIDADES DEL ICES

CONSEJO DE REPRESENTANTES

Prof. Luis Lenzano (UNCUYO)
Dr. Guido Berlín (CNEA)
Dr. Manuel Tovar (UNCUYO)
Dra. Karina Pierpauli (CNEA)

PRESIDENTE DEL CONSEJO DE REPRESENTANTES

Mag. Ing. Alberto Vich (UNCUYO)

DIRECTOR CIENTÍFICO

Dr. Martín Pedro Gómez (CNEA)

SECRETARIA EJECUTIVA

Dra. Adalgisa Scotti (CNEA)

DIRECTOR DEL ENCUENTRO

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

COMITÉ ORGANIZADOR

Gustavo Álvarez (ICES CNEA Malargüe)
Armando Barros (ICES CNEA Malargüe)
Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Gabriela Coria (ICES CNEA)
Diego Cowes (ICES CNEA)
Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Felipe Genovese (UTN FRSR)
Laura Giovino (ICES CONICET)
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)
Andrea Juárez (ICES CNEA)
Luis Eduardo Lenzano (ICES-UNCUYO-CONICET)
María Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Carlos López (UNCUYO)
Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UNSAM, UTN)
Nicolás Núñez (ICES CNEA)
Valeria Ortega Paredes (ICES CNEA)
Diego Pérez (CNEA)
Laura Salgán (CONICET)
Hernán Sánchez (ICES CNEA)
Adalgisa Scotti (ICES-CNEA-UTN)
Mónica Torrejón (UNCUYO)
Alejandra Vesga Ramírez (ICES CONICET)

Mag. Alberto Vich (IANIGLA CONICET ICES)
Paula Vildoza (ICES Regional Mendoza)
Hernán Xargay (ICES CNEA))

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Mariano Agusto (UBA-CONICET)
Dr. Jorge Barón (ICES UNCUYO)
Dr. Giovanna Cappai (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Mag. Diego Cowes (ICES CNEA)
Dr. Deyan Draganov (TU DELFT, Holanda)
Dr. Ing. Guido Ferrari (UTN-FRD)
Dr. Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Dr. Adolfo Gil (CONICET)
Dr. Martín Gómez (ICES CNEA, UTN-FRD, UNSAM)
Dr. Diego González (IMM, Bologna, Italia)
Dra. Daniela Guglietta (IGAG-CNR, Italia)
Dra. Clara Lamberti (UBA-CONICET)
Dra. María Isabel López Pumarega (ICES)
Prof. Luis Eduardo Lenzano (ICES UNCUYO-CONICET)
Dr. Stefano Millia (IGAG-CNR, Italia)
Dr. Gustavo Neme (CONICET)
Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UTN-FRD)
Mag. Diego Perez Gagni (CNEA)
Dr. José Ruzzante (UTN, UNTREF)
Dra. Laura Salgán (CONICET)
Dra. Adalgisa Scotti (ICES CNEA, UTN)
Dra. Francesca Trapasso (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Alejandra Vesga Ramírez (CONICET)
Mag. Ing. Alberto Vich (IANIGLA CONICET)
Dr. Stefano Ubaldini (IGAG-CNR, Italia)
Esp. Ing. Hernán Xargay (ICES CNEA))

COORDINADORES DE SESIÓN (MODERADORES)

Mag. Ing. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Mag. Diego Cowes (ICES CNEA, UNTREF)
Mag. Ing. Guido Ferrari (UTN)
Dr. Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Dr. Martín Gómez (ICES CNEA, UTN, UNSAM)
Mag. Andrea Juárez (ICES CNEA)
Dra. Clara Lamberti (UBA-CONICET)
Prof. Luis Eduardo Lenzano (ICES-UNCUYO-CONICET)
Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UNSAM, UTN)
Dra. Adalgisa Scotti (ICES-CNEA-UTN)
Mag. Alejandra Vesga Ramírez (CONICET)
Mag. Alberto Vich (IANIGLA CONICET)
Esp. Ing. Hernán Xargay (ICES CNEA))

VIRTUALIDAD

ASESORA DE HERRAMIENTAS VIRTUALES

Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

RESPONSABLES TÉCNICOS DE SALA VIRTUAL

Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)
Gustavo Álvarez (ICES CNEA Malargüe)
Diego Pérez (CNEA)
Diego Cowes (ICES CNEA)

COMUNICACIÓN

POR PÁGINA WEB
Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

POR CORREO ELECTRÓNICO
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)
Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)

DISEÑO DE PÓSTERES Y COMUNICACIONES
Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

Este Encuentro recibió el Subsidio del FONCyT, AGENCIA, 01-RC 2023-2023-03-00028 por un monto de 1.500.000 pesos. Investigador Responsable: Dr. Dino FILIPUSSI.

PRÓLOGO

Entre el 21 y el 24 de noviembre de 2023, el Encuentro E- ICES volvió a realizarse de manera presencial, nuevamente en su lugar de origen, el CENTRO DE CONVENCIONES THESAURUS de la ciudad de MALARGÜE, provincia de MENDOZA. Las formas de presentación de los trabajos fueron charlas orales, conferencias plenarias y posters. También se dejó un bloque de presentaciones virtuales, dado que en los años anteriores se comenzaron a sumar participantes de otras regiones y países, y de esta manera se los pudo integrar. También se integró una sala virtual de pósteres, incluyendo también los presentados en forma presencial.

Ambas concurrencias, presencial y virtual fueron muy satisfactorias, alrededor de 100 participantes presenciales con 50 presentaciones orales y unos 40 posters y más de 30 presentaciones orales virtuales (cantidad limitada de antemano por los organizadores para priorizar la presencialidad) y unos 80 posters virtuales.

Se presentaron 6 conferencias plenarias de gran nivel que fueron sobre la recuperación de materia prima mineral mediante tele relevamiento, por Stefano UBALDINI del IGAG de Italia, los aprendizajes a partir de las recientes erupciones volcánicas en la zona volcánica sur de los ANDES por Jorge E. ROMERO de la UNIVERSIDAD DE O'HIGGINS, CHILE, los avances en el conocimiento ambiental por la aplicación de isótopos estables por Adolfo GIL y Gustavo NEME del IDEVEA; UTN & CONICET, el análisis por activación neutrónica y sus áreas de aplicación por Rita PLA de la Gerencia Química Nuclear y Ciencias de la Salud - GAANS- CNEA, el rol de la capa de hielo antártica en sistema climático por Florence COLLEONI del OGS Italia y el mapeo de recursos naturales utilizando datos de satélite SAR en el marco del proyecto ITAREO por David MARZI y Paolo GAMBA

Se contó con la presencia del intendente electo del departamento MALARGÜE, el Lic. Celso JAQUE, del Cónsul General del Consulado General de Italia en MENDOZA Giuseppe D'AGOSTO y del Agregado Científico de ITALIA en ARGENTINA el Dr. Salvatore BARBA y también de una delegación de Investigadores italianos.

Retomada la presencialidad, se volvió a realizar el Concurso de Jóvenes Investigadores. El primer premio fue otorgado al trabajo “DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE MARTEMOTOS ANTE LA PRESENCIA DE DIFERENTES TIPOS DE RUIDO” de Jair ZAMPIERI de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina. El Jurado del Concurso en el E-ICES 18 estuvo integrado por la Dra. María Clara LAMBERTI, la Dra. Adalgisa SCOTTI y el Dr. Dino FILIPUSSI.

Este Encuentro recibió un subsidio RC del FONCyT, AGENCIA, 01-RC 2023-2023-03-00028 por un monto de 1.500.000 pesos siendo el Investigador Responsable el Dr. Dino FILIPUSSI.

A continuación, en este libro de ACTAS de Trabajos Completos del E-ICES 18, se presenta una selección de trabajos expuestos durante el Encuentro.

Dr. Martín Pedro GÓMEZ
Director Científico del ICES

ÍNDICE

ANÁLISIS DE RESTAURACIÓN PASIVA EN COMPLEJO MINERO DEL SUR DE MENDOZA
Gustavo G. Álvarez y Ana Rosa Castaño Gañán 1

VALIDACIÓN DE LOS ESTIMADORES DE PRECIPITACIÓN SATELITAL IMERG Y GSMAP EN 6 DEPARTAMENTOS DE LA REGIÓN PAMPEANA
Juan Guillermo Barberis y Mariana Barrucand 13

ANALISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN CUENCAS DE LLANURA DEL NORESTE DE BUENOS AIRES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL ARROYO LAS CONCHITAS
Sebastián I. Besteiro, Fabio A. Montealegre Medina, Adriana C. Guzmán Guaraca, Mariano Velázquez y Fernanda J. Gaspari 22

AVANCES EN LA GESTIÓN SUSTENTABLE DEL RECURSO HÍDRICO EN CUENCAS DEL NORESTE DE BUENOS AIRES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL ARROYO EL PESCADO
Sebastián I. Besteiro, María Isabel Delgado, Claudia V. Di Lello, y Eleonora S. Carol 29

ANALISIS DE DOS EVENTOS DE CALENTAMIENTO SUBITO ESTRATOSFERICO Y SU IMACTO AL VORTICE POLAR Y EL AGUJERO DE OZONO DEL HEMISFERIO SUR
Gerardo Carbajal Benítez, Héctor Ochoa, Lino Condori y Héctor Estévez Pérez 38

PLANTAS FITORREMEDIADORAS DEL COMPLEJO MINERO FABRIL DE SAN RAFAEL, MENDOZA-ARGENTINA
Ana R. Castaño Gañán, Rita Plá, Gustavo G. Álvarez, Adalgisa Scotti, Rodrigo Invernizzi y Raquel Jasan 48

BÚSQUEDA POR NOVEDAD PARA LA PREDICCIÓN DE FENÓMENOS
Paola Caymes-Scutari, Jan Strappa y Germán Bianchini 63

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL Y EL ESTADO DE LA VEGETACIÓN. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA. CÓRDOBA. ARGENTINA
Lucía de Antueno y Fernanda J. Gaspari 75

DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA. CÓRDOBA. ARGENTINA
Lucía de Antueno y Fernanda J. Gaspari 85

ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE UN PESTICIDA
José A. Gálvez, José A. Cantero, Lucas A. Caride, Pablo Salomón, Cecilia López y Sergio A. Vardaro 95

ESTUDIO DE CALIDADES METÁLICAS EN ELEMENTOS DE FIJACIÓN PERTENECIENTES AL HISTÓRICO FERROCARRIL CENTRAL ARGENTINO (FCCA)
Marcos Giupponi, Miguel Franetovich, Patricia Carrizo, Cecilia Deyá, Leonardo Bianchi, Carlos Villalonga y Hugo Alfonso 103

INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN SIMPLIFICADA DE EDIFICACIONES PRE- Y POST-EVENTO SÍSMICO
Miguel D. Granda y Hernán D. Xargay 109

REMOCIÓN DE COBRE MEDIANTE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL
Natalia A. Hidalgo, Luis A. Cañari, Melisa B. Rosa y Ester N. Cano 121

ESTUDIOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS – GEOELÉCTRICOS APLICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LENTES DE AGUA DULCE EN AMBIENTES INTERMAREALES
María Paula Leal, Santiago Perdomo y Eleonora Carol 127

VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE EVENTOS COMPUESTOS CÁLIDOS Y HÚMEDOS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA
Agustina López Ramírez, Mariana Barrucand y Soledad Collazo 133

UTILIZACIÓN DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EVALUAR LA CONDICIÓN TRANSFRONTERIZA DEL ACUÍFERO SALTO
Agustina G. Martin Pedrol, Julián Ramos, María Eugenia Franzoni, Fabiana Robledo, Andrea Rodríguez y Regina Mancuso 143

MODELADO NUMÉRICO DE DISPERSIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA POR ENSAMBLES: CASO ERUPCIÓN DEL VOLCÁN LÁSCAR DICIEMBRE 2022
Micaela Clara Maurizi y María Soledad Osores 155

EXPLORACIÓN DE DATOS GEOESPACIALES DE CALIDAD DE AIRE EN LA CUENCA DEL RÍO RECONQUISTA. PROVINCIA DE BUENOS AIRES.ARGENTINA
Virginia Mondelo, Gabriela Mazzucchelli, Guillermo Jelinski, Aylén Pontoriero y Fernanda Gaspari 168

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA GEOESPACIAL CON GEOQ DE ESCENARIOS PLUVIALES EXTREMOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RECONQUISTA. BUENOS AIRES, ARGENTINA
Virginia Mondelo, Gabriela Mazzucchelli, Guillermo Jelinski y Fernanda Gaspari 175

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA CALIZA
M. Mariel Negrelli, María Inés Castro y Eugenia Caroprese 186

MODELIZACIÓN NUMÉRICA Y A ESCALA LABORATORIO PARA ESTUDIAR LA FACTIBILIDAD DE DETECCIÓN DE TÚNELES HISTÓRICOS MEDIANTE EL MÉTODO GEOELÉCTRICO
Gustavo Quiroz, Alberto Lucuy, María Victoria Bongiovanni y Matías de la Vega 193

IMPLICANCIAS DE LA LITOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DEL RÍO FITZ ROY Y SU IMPORTANCIA EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO GEOLÓGICO EN EL CHALTÉN
Daniela Schmidt, Diego Winocur y Pierre Pitte 205

DINÁMICA DEL GLACIAR TORRE Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO, PNLG, SANTA CRUZ
Daniela Schmidt, Diego Winocur y Pierre Pitte 215

BIOPOLÍMEROS Y MICROBIOTA EN MUESTRAS DE SEDIMENTO ESTUARINAS-COSTERAS
Evelyn L. Schwab, Romina Sánchez, Ana M. Martínez, Lorena Brugnoni, Valentina Farías-Elorriaga y Florencia Biancalana 222

RECOLECCIÓN Y COMUNICACIÓN DE DATOS AMBIENTALES CON EMPLEO DE SOLUCIONES I.O.T. Y TECNOLOGÍAS LIBRES: ESTACIÓN CHACRAS DE CORIA

Abel O. Serú, Regina B. Aguilera y Eva M. Maure Russo 232

COMPARACIÓN ENTRE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL DE TUCUMAN (26.8°S, 65.1°O) Y LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS ERA5
Cristóbal I. Silvero, Franco D. Medina, Bruno S. Zossi, Gustavo A. Mansilla, Teresita Heredia, Fernando Nollas y Ana G. Elias 240

EVALUACIÓN DE DOS DISEÑOS DIFERENTES DE PEQUEÑOS ESPACIOS VERDES. DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT
Susana Stocco, M. Alicia Cantón, y Érica N. Correa 247

LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA LADERA OCCIDENTAL DE LA SIERRA DEL ACONQUIJA, PROVINCIA DE CATAMARCA
Mario A. Toledo, Gloria P. Ibáñez Palacios, Silvia V. Páez y Paolo F. Saccone 258

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO Y ANDESITA SOMETIDAS A COMPRESIÓN UNIAXIAL
Alejandra Vesga-Ramírez, Dino Filipussi, Emilio Camilión y Martín Gómez 270

FORTALECIMIENTO DE LA SEGURIDAD AMBIENTAL EN CENTRALES NUCLEARES: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INNOVADOR DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA
J. Vorobioff, F. Checozzi, T. Garrón Pinto, G. Antaurco, F. G. Nieva, M. N. Morgada Boggio, D. Filipussi, D. Nonino y C. Rinaldi 282

INSPECCIÓN DE EDIFICACIONES POST-SISMO EN ECUADOR 2023
Hernán D. Xargay 290

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE MARTEMOTOS ANTE LA PRESENCIA DE DIFERENTES TIPOS DE RUIDO
Jair Zampieri, Danilo R. Velis y Juan I. Sabbione 298

ANÁLISIS DE RESTAURACIÓN PASIVA EN COMPLEJO MINERO DEL SUR DE MENDOZA

Gustavo G. Alvarez[a], Ana Rosa Castaño Gañán[a]

[a]*ICES, CNEA, ARGENTINA*

e-mail: gustavoalvarez@cnea.gov.ar

RESUMEN

La minería a cielo abierto ocasiona una serie de impactos sobre el ambiente, interpretados por la ciencia ecológica como disturbios antrópicos. Estos disturbios inciden sobre distintos factores ecosistémicos, entre ellos, la vegetación. En proyectos mineros suelen emplearse técnicas de restauración para recomponer la vegetación intervenida, en donde la restauración pasiva, aquella sin intervención antrópica, aparece como una alternativa a explorar en sitios donde no existan limitantes para la sucesión natural. El objetivo del presente trabajo es analizar la restauración pasiva de un sitio disturbado en un complejo minero del sur de Mendoza, a partir de la comparación de su composición y estructura florística con un sitio natural de referencia. El área específica en estudio comprende un dique de evaporación estabilizado con material de relleno cuya última intervención fue en el año 2013. Sobre esta área en el año 2022 se realizó un muestreo de vegetación donde se obtuvieron datos de cobertura vegetal, abundancia y riqueza de especies y se aplicó el índice de similitud de Sørensen cuantitativo para comparar ambos sitios. Los resultados indican una similitud del 31% entre sitios (baja similitud), con mayor diversidad y abundancia de especies en el sitio natural de referencia con respecto al sitio disturbado (29>15 y 978>316 respectivamente) y una cobertura vegetal similar (43% y 44%), con influencia de especies exóticas en este último. En conclusión, la restauración del sitio es incompleta, lo cual se condice con estudios análogos en zonas áridas para el período de tiempo analizado. La información recabada es de gran utilidad para estimar el alcance de los procesos de restauración pasiva y para elaborar planes de manejo eficientes en sitios que requieran restauración asistida. Se propone el seguimiento en el tiempo de estas comunidades vegetales para evaluar el potencial de la restauración pasiva como método de gestión ambiental del sitio.

Palabras Clave: Restauración, Minería, Sucesión Ecológica, Flora, Disturbio

INTRODUCCIÓN

En el Sur de Mendoza, departamento de San Rafael, se halla el Complejo Minero Fabril San Rafael (CMFSR), perteneciente a la Comisión Nacional de Energía Atómica (Fig. 1). Allí se extrajo a cielo abierto y procesó mineral de uranio entre los años 1975 y 1997. Desde entonces se desarrollan en el Complejo tareas de monitoreo, investigación y gestión ambiental sobre los disturbios generados por la actividad minera. Estos disturbios se manifiestan principalmente a nivel de paisaje, suelo y vegetación. En este último nivel, la incidencia de los disturbios implicó la eliminación total o parcial de la cobertura vegetal, observándose actualmente indicios de restauración pasiva en algunos sitios.

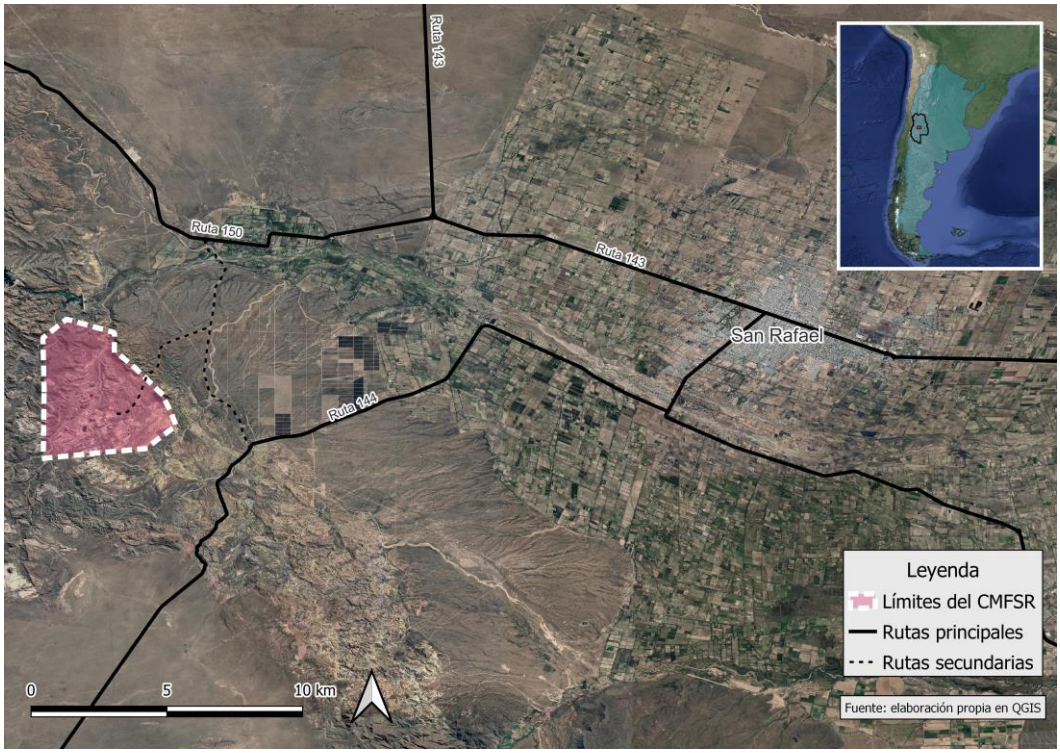


Figura 1. Localización del Complejo Minero Fabril San Rafael. Fuente: elaboración propia en base a información de Comisión Nacional de Energía Atómica, 2014.

La restauración pasiva es un proceso de recuperación natural de un ecosistema tras un disturbio (Vargas, 2007). En ecosistemas terrestres, la primera limitante para la restauración está determinada por la actividad causante del disturbio. Tras el cese de la misma, el estado de los factores abióticos puede constituir la siguiente limitante, principalmente las condiciones topográficas, de sustrato y la hidrología. Una vez superadas estas barreras, tendrá lugar el potencial restablecimiento de la vegetación, la llegada de la fauna y finalmente la interrelación de factores bióticos y abióticos con el correspondiente flujo de materia y energía propios de cada ecosistema (McDonald *et al*., 2016). El rol de la vegetación en los procesos de recuperación de los ecosistemas es clave. Específicamente, define muchos aspectos de la estructura, composición y función de los ecosistemas terrestres y a su vez define en gran parte la sucesión ecológica, ya que provee la mayor parte de la biomasa, ofrece la estructura física al resto de las comunidades (hábitat para la fauna), constituye el punto de partida de numerosas tramas tróficas y forma parte activa del ciclo de nutrientes (Zuleta y Reichmann, 2013; Aguilar-Garavito, 2015).

La sucesión ecológica es un proceso de cambios seriales en donde unas especies sustituyen a otras en el tiempo (Connell y Slatyer, 1977). Considerando que las diferentes etapas de la dinámica sucesional están caracterizadas por ciertas especies dominantes, los disturbios pueden conducir a secuencias razonablemente predecibles de especies porque éstas tienen diferentes estrategias para explotar recursos (Begon *et al*., 2006). En muchos casos, la tendencia es que un ambiente en proceso de cambio se aproxime a las condiciones de áreas adyacentes (Gleason, 1926). Cuando no existe información sobre las condiciones de un ecosistema previas al disturbio, deben considerarse estas áreas sin degradación o áreas más resilientes como modelo de referencia (McDonald *et al*., 2016).

Un ecosistema restaurado debería presentar una composición de especies y estructura a nivel de comunidad similar al ecosistema de referencia (Navarro Cano *et al*., 2017).

El objetivo del presente trabajo es analizar la restauración pasiva en un dique de evaporación, a partir de la comparación de su composición y estructura florística con la de un sitio natural de referencia. El sitio de estudio es un dique, denominado DN1, constituido por precipitados provenientes de la neutralización de efluentes y estabilizado entre los años 2007 y 2013, con material de relleno conformado por rocas y areniscas provenientes del mismo Complejo (Fig. 2). El proceso de estabilización consiste en la incorporación de material estéril de relleno para evitar la dispersión de los precipitados. Se ha observado a partir de imágenes satelitales una importante recuperación de la cobertura vegetal tras 9 años de finalizadas estas actividades (Fig. 3).



Figura 2. Zona de diques, CMFSR. Fuente: elaboración propia en base a información de Comisión Nacional de Energía Atómica, 2014

 ISBN 978-987-1323-91-3



Figura 3. Dique DN1. Izquierda: imagen satelital año 2013. Obsérvese el material de relleno sin cobertura vegetal. Derecha: imagen satelital año 2022. Sitio con indicios de restauración pasiva. Fuente: *Google Earth Pro*

La restauración pasiva no implica abandonar el ecosistema, sino la eliminación de la actividad antrópica que ocasiona el disturbio sobre el sitio considerado, la conservación del mismo garantizando que no se generen nuevos disturbios a partir de otros agentes externos y un seguimiento en el tiempo de estos procesos para evaluar el éxito de la restauración. Por lo general, es menos costoso y más eficiente promover la revegetación natural, en lugar de otras estrategias de revegetación (Berrahmouni *et al*., 2017; Gann *et al*., 2019). La sucesión puede tardar más tiempo en alcanzar los objetivos que la restauración asistida (aquella con intervención antrópica directa), pero esto puede verse compensado por una mayor diversidad estructural y funcional y un mayor valor de conservación natural de la vegetación resultante (Prach *et al*., 2007). Además, el éxito de un proceso de restauración asistida dependerá en gran medida del conocimiento técnico y dominio de los procesos de sucesión natural. La forma más adecuada de abordar la restauración ecológica es favorecer los procesos de recuperación natural, complementando estos procesos en la medida en que el potencial de recuperación natural se haya visto intervenido, procurando una intervención mínima (Mola *et al*., 2018).

METODOLOGÍA

El primer paso metodológico consistió en la selección de un sitio natural de referencia. Para ello, se tuvo presente la cercanía al sitio disturbado, la ausencia de impactos de la actividad minera, la ausencia de especies exóticas, la dirección preponderante de los vientos (Sudeste a Noroeste), debido a la dispersión anemócora de algunas especies, y la extensión del área equivalente al sitio disturbado. El sitio de referencia se localizó a aproximadamente 100 metros del sitio disturbado, en dirección Sudeste (Fig. 4).
Para comparar la composición y estructura florística de ambos sitios, se aplicó el índice de Sørensen cuantitativo a partir de la riqueza de especies y sus abundancias, y se calculó la cobertura vegetal. Se realizó un muestreo aleatorio estratificado, estableciendo en cada sitio 5 parcelas circulares de 100 m^2 para el conteo de especies y sus abundancias, y 5 transectos de 20 metros para el cálculo de cobertura a partir del método línea de

intercepción (Canfield, 1941) (Fig. 4). El área de muestreo para el conteo de especies fue superior al 1% del área de la población en estudio. Para estimar la influencia de la aleatoriedad del muestreo en los resultados obtenidos se aplicó el test paramétrico de *Student* en el software Past 4.09, obteniendo un valor p inferior al nivel de significación (0,05).

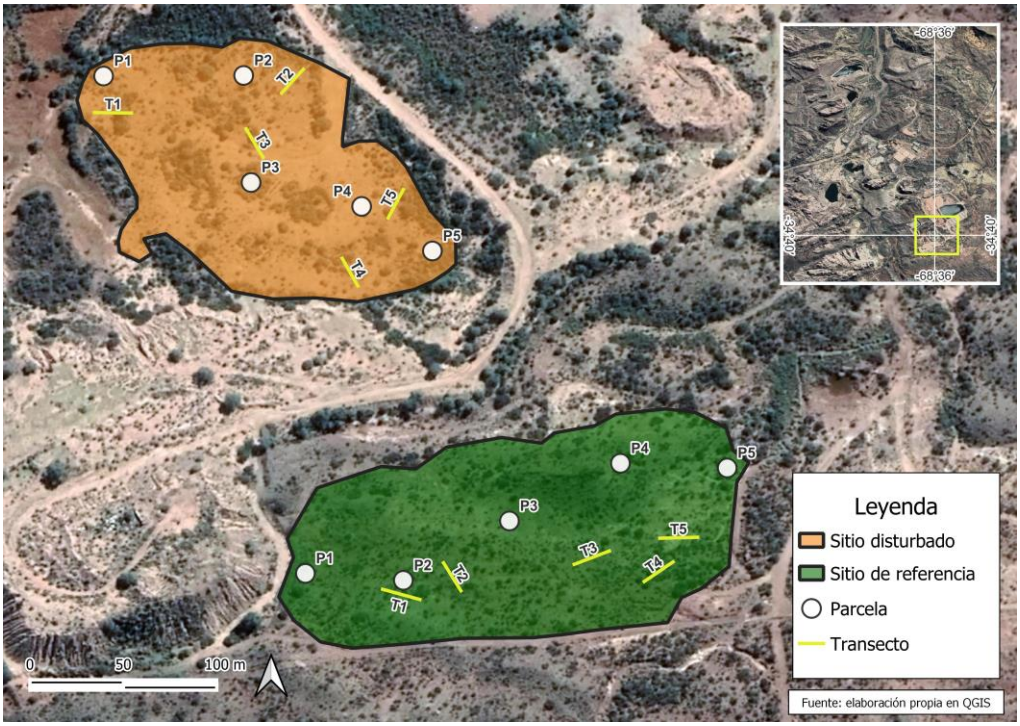


Figura 4. Parcelas y transectos establecidos en sitio disturbado y sitio de referencia

El índice de Sørensen cuantitativo fue introducido por Bray y Curtis (1957), y su fórmula es la siguiente:

$$S = \frac{2jN}{Na + Nb}$$

Donde Na es el número total de individuos en un sitio A, Nb es el número total de individuos en un sitio B y $2jN$ es la sumatoria de la menor de las abundancias de cada una de las especies compartidas entre ambos sitios.
Este índice expresa un valor entre 0 y 1, siendo 1 el valor de máxima similitud entre muestras (Magurran, 2004). Un valor de similitud de 0,80 normalmente indica un alto grado de similitud entre dos sitios (Chambers y Brown, 1983). Estos valores suelen expresarse como porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron un total de 15 especies en el sitio disturbado (SD) y 29 especies en el sitio de referencia (SR). El número total de individuos fue de 316 para SD y 978 para SR. En la Tabla I se muestran los resultados del conteo por especie. En el área de estudio la vegetación está conformada por un matorral abierto, con escasos pastos perennes y vegetación anual durante la época de lluvias y se caracteriza por una baja densidad y

cobertura entre 40% y 60% (Comisión Nacional de Energía Atómica, 2014). Las especies halladas en el muestreo son en gran parte arbustivas, con presencia de algunas herbáceas, cactáceas solo en el SR y especies arbóreas solo en el SD (*Schinus areira* y *Tamarix gallica*), con un total de 12 especies compartidas entre sitios. Solo tres especies son exclusivas del SD, *Schinus areira*, *Tamarix gallica* y *Baccharis salicifolia*.

Tabla I. Riqueza de especies y abundancia para Sitio de Referencia y Sitio Disturbado.

	Abundancia			Abundancia	
Especie	Sitio de Referencia	Sitio Disturbado	Especie	Sitio de Referencia	Sitio Disturbado
Acantholiphia seriphiodes	5	-	*Mulgurea aspera*	3	2
Adesmia trijuga	22	-	*Neltuma alpataco*	13	13
Baccharis salicifolia	-	56	*Opuntia sulphurea*	14	-
Baccharis spartioides	18	-	*Polygala spinescens*	6	-
Bouganvillea spinosa	3	-	*Prosopidastrum globosum*	5	-
Chuquiraga erinacea	7	-	*Prosopidendrum globosum*	2	-
Condalia microphylla	3	1	*Schinus areira*	-	5
Denmoza rhodacantha	2	-	*Schinus polygamus*	4	2
Eupatorium bunnifolium	11	19	*Senecio subulatus*	1	38
Fabiana peckii	56	1	*Senna aphylla*	43	2
Gochnatia glutinosa	11	-	*Stipa ichu*	178	161
Hyalis argentea	464	2	*Trichocereus candicans*	26	-
Junellia chritmifolia	26	4	*Ximenia americana*	2	-
Larrea divaricata	6	-	*Tamarix gallica*	-	8
Lycium gilliesianum	1	-	*Zuccagnia punctata*	44	2
Maihueniopsis darwinii	1	-	Total especies	29	15
Monttea aphylla	1	-	Total abundancia	978	316

Con los datos de riqueza y abundancia por especie se aplicó el índice de Sørensen cuantitativo para comparar la similitud de ambos sitios en su diversidad beta. El resultado del índice fue de 0,31, es decir, un 31% de similitud entre sitios. Sin embargo, este valor ha sido influenciado por la alta abundancia de *Hyalis argentea* (en su mayoría renuevos) en algunas parcelas del SR, la cual, extrayendo a *Stipa ichu*, es casi diez veces superior a la tercera especie más abundante en este sitio. Para reducir la importancia de estos valores extremos y mejorar la contribución de las especies raras se procedió a transformar los datos (Krebs, 2014), a partir de la raíz cuadrada de la abundancia de cada especie y mediante la exclusión de *Hyalis argentea*. Los valores obtenidos con estas intervenciones de los datos fueron de 0,38 y 0,48, respectivamente. De esta forma, el valor máximo de similitud entre el sitio disturbado y el sitio de referencia fue de 48% con la exclusión de la especie más dominante y el mínimo fue de 31%, sin intervención de los datos.

Los valores obtenidos por el índice de Sørensen cuantitativo, aún con la exclusión de la especie más dominante, no llegan al 50%, lo cual indica baja similitud entre sitios.

En la zona de estudio predomina el clima árido, con un déficit hídrico permanente debido a las escasas precipitaciones y la elevada tasa de evaporación (Comisión Nacional de Energía Atómica, 2014). Una baja similitud es reportada por otros autores en estudios sobre zonas áridas, disturbios análogos y períodos de tiempo similares. La baja resiliencia de ecosistemas áridos comparados con otros biomas, debido a la escasez hídrica de estos ambientes, con eventos lluviosos impredecibles que afectan el reclutamiento y establecimiento de plántulas, hace que la restauración pasiva sea extremadamente lenta (Miranda *et al*., 2004; Pérez, 2013; Gonnet *et al*., 2013; Berrahmouni *et al*., 2017).

Además del tiempo, son múltiples las variables que inciden en los procesos de restauración pasiva, entre ellas, la magnitud y tipo de disturbio, las características del sustrato, las características intrínsecas de las especies, el banco de semillas del suelo, los agentes dispersores circundantes, la humedad y el clima. Una de las mayores limitantes

para la restauración es el suelo, particularmente sensibles a disturbios y procesos erosivos en zonas áridas y semiáridas, debido a su inestabilidad estructural, baja capacidad de retención de agua y bajo contenido de materia orgánica (Raffaele *et al*., 2014). No se realizó muestreo sobre este factor, por lo tanto, se desconoce si las características del mismo pueden potencialmente limitar o favorecer el asentamiento de algunas especies. Cabe mencionar la diferencia de sustratos entre sitios, siendo el del sitio disturbado un sustrato de relleno producto de la estabilización del dique y el de referencia un sustrato natural en proceso mecánico de formación.

Las especies más abundantes en el sitio disturbado (Fig. 5) fueron *Stipa ichu*, *Baccharis salicifolia*, *Senecio subulatus*, *Eupatorium bunniifolium* y *Neltuma alpataco*. *Stipa ichu* es una herbácea perenne de dispersión anemócora que rebrota rápidamente (Dalmasso *et al*., 2008) y fue hallada en abundancia similar en ambos sitios. *Senecio subulatus* crece en ambientes disturbados y es considerada pionera en la sucesión (Castro *et al*., 2013; Zuleta y Escartín, 2014; Fernández *et al*., 2015; Masini *et al*., 2016) mientras que *Baccharis salicifolia*, de dispersión anemócora, suele dominar sitios disturbados y restaurados (Vibrans, 2012). Esta última fue hallada en gran cantidad en otros sitios disturbados del Complejo, específicamente en zona de diques. En contraste, en el sitio de referencia no se halló *Baccharis salicifolia* y solo se muestreó un individuo de *Senecio subulatus*. La presencia de estas especies pioneras casi exclusivamente en el sitio disturbado puede ser indicativo de etapas tempranas de la sucesión o bien pueden haber provenido de otras fuentes de propágulos, como el banco de semillas del material de relleno o sitios aledaños distintos al de referencia. *Eupatorium bunniifolium* y *Neltuma alpataco* fueron identificadas con una abundancia similar en ambos sitios. Esta última es considerada una especie climácica, es decir, propia de comunidades maduras (Pérez *et al*., 2013; Castro *et al*., 2013; Zuleta y Escartín, 2014).



Figura 5. Sitio disturbado

 ISBN 978-987-1323-91-3

Se hallaron en el sitio disturbado dos especies exóticas. Estas especies son *Tamarix gallica*, especie colonizadora, habitual en zonas disturbadas (Natale *et al*., 2008; Dalmasso y Martínez Carretero, 2021) y *Schinus areira*, con facilidad para adaptarse a distintos tipos de suelo y rápido crecimiento (Almeida y Lima, 2014). Estas especies tienen fuentes de propágulos cercanas al sitio disturbado, lo cual ha facilitado su establecimiento. Además, la invasión de exóticas generalmente aumenta luego de un disturbio (Van Andel y Aronson, 2006). En algunos casos se observaron especies nativas establecidas bajo la sombra de *Schinus areira*.

Por otra parte, las especies dominantes en el sitio de referencia (Fig. 6) fueron *Hyalis argentea*, *Stipa ichu*, *Fabiana peckii*, *Zuccagnia punctata* y *Senna aphylla*. *Hyalis argentea* es reportada como colonizadora de ambientes disturbados, tanto naturales como antrópicos (Pérez *et al*., 2013; Gandullo *et al*., 2016; Masini *et al*., 2016). Posee un sistema radical que le permite una extensión de renuevos a un metro de distancia, alcanzando gran cobertura en poco tiempo (Dalmasso *et al*., 2008). La mayor abundancia de esta especie se halló al Oeste del sitio de referencia, específicamente en las parcelas 1, 2 y 3. Solo se hallaron dos ejemplares de esta especie en el sitio disturbado. *Zuccagnia punctata* es un arbusto de hasta 3 metros de altura que crece con rapidez en variados tipos de suelos, aún en grietas de rocas y en pendientes pronunciadas (Dalmasso *et al*., 2008; Abalos, 2016). Esta especie, abundante en el sitio de referencia, solo reportó dos ejemplares en el sitio disturbado con la metodología empleada, no obstante, fuera del muestreo aleatorio pudieron observarse individuos en campo con gran distribución y desarrollo (individuos de hasta 2 metros de altura). *Fabiana peckii* y *Senna aphylla* son especies con amplia distribución en los campos naturales del Complejo.



Figura 6. Sitio natural de referencia

 ISBN 978-987-1323-91-3

Solo fueron halladas cactáceas en el sitio de referencia, el cual presentó mayor diversidad de familias. El crecimiento de muchas de estas especies suele estar asociado a plantas leñosas (Fowler, 1986; Gonnet *et al*., 2013). Esto fue observado en campo para las especies *Opuntia sulphurea* y *Trichocereus candicans*, no así para *Denmoza rhodacantha*, la cual según Méndez (2007) parece no estar asociada con plantas nodriza, pero sí con sitios abiertos o disturbados con mayor exposición solar. Los cactus *opuntioides* suelen crecer tanto bajo arbustos como en áreas abiertas, mientras que los globosos y columnares suelen crecer debajo de arbustos (Almirón y Martínez Carretero, 2015). El suelo bajo plantas nodriza tiene un contenido mayor en nutrientes que el suelo abierto circundante formando "islas de fertilidad" (Ávila *et al*., 2008). Los arbustos y cactus que contribuyen a la formación de estas islas en ecosistemas áridos son fundamentales en los procesos de restauración, ya que actúan como trampa de restos orgánicos y semillas transportadas por el viento, acumulan humedad, brindan sombra, disminuyen la temperatura en verano, otorgan protección contra la herbivoría, y enriquecen el suelo en potasio, fosfato, nitratos y materia orgánica (Beider *et al*., 2013; Ciancio *et al*., 2013).

Las cactáceas observadas se asociaron principalmente a *Zuccagnia punctata*, arbusto al cual se han asociado otras especies de cactus (Almirón y Martínez Carretero, 2015). En cuanto a las formas de dispersión de las cactáceas, los cactus columnares y globosos sólo se reproducen sexualmente a través de la germinación de semillas, mientras que los cactus *opuntioides* son capaces de reproducirse tanto sexualmente como asexualmente (Almirón y Martínez Carretero, 2015). *Opuntia sulphurea* presenta una rápida y efectiva propagación agámica a partir de sus cladodios, porción de vástago o rama comprimida y articulada (Méndez, 2006). Estudios sobre las formas de dispersión de estas especies podrían contribuir a identificar las barreras que impiden su presencia en el sitio disturbado.

La composición florística del sitio disturbado podría verse influenciada por el banco de semillas presente en el material de relleno. Por lo general, las especies en el banco de semillas son plantas anuales y otras especies de vida corta (Begon *et al*., 2006), sin embargo, las especies identificadas en el sitio disturbado en su mayoría son perennes con gran estado de desarrollo en algunos casos.

En contraste con los datos de similitud obtenidos, la cobertura entre sitios arrojó resultados similares, siendo de 44% para SD y 43% para SR. Estos porcentajes de cobertura están dentro de lo reportado para el área en estudio. La recuperación de la cobertura vegetal luego de un disturbio puede ser relativamente rápida, mientras que alcanzar condiciones similares de composición de especies puede tomar más tiempo (Lavorel, 1999). El sitio disturbado presentó una distribución agregada de la vegetación, mientras que, el sitio de referencia presentó una cobertura homogénea. Se destaca en el sitio disturbado la influencia sobre la cobertura total que tienen *Tamarix gallica y Schinus areira*, dos especies exóticas de porte arbóreo. No existen datos acerca de la llegada de *Tamarix gallica* al sitio, solo se tiene certeza de su presencia desde antes del año 2006. Se sabe de su uso como arbolado y de su naturalización en varios lugares de Mendoza, entre ellos el río Diamante, cercano al Complejo (Soria *et al*., 2007). Esta es una especie pionera y ha formado dos bosques extendidos al Norte del sitio disturbado y al Este pasando el camino de acceso. Por otra parte, *Schinus areira* es una especie de rápido crecimiento y está distribuido a orillas de gran parte de los caminos internos del Complejo.

CONCLUSIONES

El sitio en estudio presenta una restauración incompleta, evidente por la baja similitud frente al sitio de referencia. Teniendo en cuenta la lentitud de los procesos de restauración pasiva en zonas áridas, se propone el monitoreo de este y otros sitios para evaluar la evolución de la similitud a mayor escala temporal. Esto, además, podría aportar información valiosa sobre especies pioneras, tardías, dominantes, codominantes, raras y especies con potencial uso en restauración asistida.

Se destaca la presencia de especies nativas propias de comunidades maduras (*Zuccagnia punctata* y *Neltuma alpataco*) y la ausencia de cactáceas en el sitio disturbado.

Los valores similares de cobertura están influenciados por dos especies exóticas de porte arbóreo (*Schinus areira* y *Tamarix gallica*) muy distribuidas en la provincia de Mendoza.

La metodología empleada puede ser replicada en otros sitios con indicios de restauración pasiva, incorporando a la investigación análisis de los sustratos y estudios específicos sobre algunas familias/especies para comprender los procesos de sucesión ecológica que se desarrollan en el Complejo.

Realizar un seguimiento de los procesos de restauración pasiva es de gran utilidad para evaluar el potencial de regeneración de los sitios y las escalas temporales de estos procesos, además, permite identificar la necesidad de incorporar acciones de restauración asistida y el alcance que deben reunir, y evitar el uso ineficiente de recursos en zonas en donde la restauración pasiva alcanza niveles aceptables.

REFERENCIAS

Abalos, R. M. *Plantas del Monte Argentino: guía de campo.* 2ª ed. Córdoba: Ecoval Editorial (2016).

Aguilar-Garavito, M., Ramírez, W. (Eds.). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2015).

Almeida Huaraca, M. A., Lima Remache, G. A. *Análisis de la capacidad y tolerancia que presentan las especies forestales introducidas Cepillo Rojo (Callistemon citrinus) y Molle (Schinus areira) y las especies vegetales nativas Guarango (Mimosa quitensis) y Chilca (Baccharis latifolia) en suelos contaminados con plomo y níquel en el Parque Zonal Puertas del Sol, distrito Metropolitano de Quito*. (Tesis). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Ecuador (2014).

Almirón, M. G., Martínez Carretero, E. Interactions between Eriosyce villicumensis (Cactaceae) and shrubs: a study case in the hyper arid Monte desert of Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 50* (1): 61-70 (2015).

Ávila, J. U., Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A. Sucesión en el Matorral Desértico de Larrea tridentata (DC.) Cov. en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Terra Latinoamericana* 153-160. (2008).

Begon, M., Townsend, C. R., Harper, J. L. *Ecology: from Individuals to Ecosystems*. 4th ed. Blackwell Publishing Ltd. (2006).

Beider, A., Ciano, N., Zerrizuela, R. Revegetación artificial de taludes de locaciones en corte en la cuenca del Golfo San Jorge. En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (213-224). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Berrahmouni, N., Regato, P., Parfondry, M. *Directrices mundiales para la restauración de bosques y paisajes degradados en las tierras secas: fortalecer la resiliencia y mejorar los medios de subsistencia*. Roma, Estudio FAO Montes n° 175 (2017).

Bray, R. J., Curtis, J. T. An Ordination on of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, Vol. 27, N° 4, 325- 349 (1957).

Canfield, H. R. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry*. Pp. 388-394 (1941).

Castro, M. L., Zuleta, G. A., Pérez, A. A., Ciancio, M. E., Tchilinguirian, P., Escartín, C. A. Rehabilitación de estepas arbustivas en locaciones petroleras del Monte Austral. Evaluación de la técnica de escarificado I: vegetación. En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (225-245). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Chambers, J. C., Brown, R. W. *Methods for Vegetation Sampling and Analysis on Revegetated Mined Lands*. Gen. Tech. Rep. INT-151. Ogden, UT: 95 U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station (1983).

Ciancio, M. E., Tchilinguirian, P., Zuleta, G. A., Castro, M. L., Pérez, A. A. Rehabilitación de estepas arbustivas del Monte Austral en explanadas petroleras. Evaluación de la técnica de escarificado II: suelo y microtopografía. En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (246-260). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Comisión Nacional de Energía Atómica. *Manifestación General de Impacto Ambiental. Complejo Minero Fabril San Rafael. Etapa de remediación. Fase I.* (2014).

Connell, J. H., Slatyer, R. O. Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability and Organization. *The American Naturalist*, Vol. 111, No. 982 pp. 1119-1144, 1977 (1977).

Dalmasso, A. D., Candia, R., Ganci, C. Xerojardinería con especies nativas. Fundacón CRICYT-CONICET-IADIZA. *Boletín de Extensión Científica* 6 (2008).

Dalmasso, A., Martínez Carretero, E. Restauración de ambientes degradados: aspectos teóricos y prácticos en tierras secas de Argentina. *Geobotánica y Fitogeografía*, IADIZA (CONICET) – FCEFyN – UNSJ. (2021).

Fernández, M. E., Cony, M. A., Passera, C. B. Respuestas fisiológicas de plantines de Senecio subulatus a diferentes niveles de suministro de agua. En Martínez Carretero, E. y Dalmasso, A. (Eds.). *Restauración Ecológica en la Diagonal Árida de la Argentina 2*. Pp. 233-241. CONICET, Mendoza, Argentina (2015).

Fowler, N. The Role of Competition in Plant Communities in Arid and Semiarid Regions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 17, pp. 89- 110 (1986).

Gandullo, R., Siffredi, G., Velasco, V. *Guía para el reconocimiento del norte neuquino. 1a ed.* San Carlos de Bariloche, Río Negro: Ediciones INTA (2016).

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallet, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzalez, E., Shaw, N., Decleer, K., Dixon, K. W. Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica. Segunda edición. *Restauration Ecology 27* (S1): S1–S46., Society for Ecological Restauration (2019).

Gleason, H. A. The Individualistic Concept of the Plant Association. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, Vol. 53, No. 1 pp. 7-26. Published by: Torrey Botanical Society Stable (1926).

Gonnet, J. M., Pastor, L., Boaglio, G., Gudiño, G., Dansey, J. M., Castro Videla, F. M. Recuperación de cactáceas en un desmonte de matorral de piedemonte semiárido de Mendoza, Argentina. En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (369-376). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Krebs, J. C. *Ecological Methodology 3ra ed.* (2014).

Lavorel, S. Ecological diversity and resilience of Mediterranean vegetation to disturbance. *Blackwell Science Ltd., Diversity and Distributions*, 5, 3–13 (1999).

Magurran, A. E. *Measuring biological diversity*. Blackwell Science Ltd. (2004).

Masini, A. C. A., Rovere, A. E., Pirk, G. I. Germinación de Gutierrezia solbrigii y Senecio subulatus, asteráceas endémicas de Argentina. *Phyton* (Buenos Aires), 85(2), 314-323 (2023, 26 de enero).

McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., Dixon, K. W. *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts*. Society for Ecological Restoration. Traducido por Concha, C. Washington, D. C. Estados Unidos (2016).

Méndez, E. Opuntia sulphurea, un indicador de sobrepastoreo en matorrales de Larrea divaricata. Oeste de Mendoza (Argentina). *Revista de 101 Facultad de Ciencias Agrarias. UNCuyo. Tomo XXXVIII. N° 1*. pp 27-34. Universidad Nacional de Cuyo Mendoza, Argentina (2006).

Miranda, J. D., Padilla, F. M., Pugnaire, F. I. Sucesión y restauración en ambientes semiáridos. *Ecosistemas 13*, 55-58 (2004).

Mola, I., de Torre, R., Sopeña, A. (Eds.). *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica, España (2018).

Natale, E. S, Gaskin, J., Zalba, S. M., Ceballos, M., Reinoso H. E. Especies del género Tamarix (Tamaricaceae) invadiendo ambientes naturales y seminaturales en Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* v.43, n. 1-2 Córdoba (ene/jul. 2008)

Navarro Cano, J. A., Goberna Estellés, M., González Barberá, G., Castillo Sánchez, V. M., Verdú del Campo, M. *Restauración ecológica en ambientes semiáridos. Recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas.* Gráficas Álamo SL, Murcia, España, 1ra Edición (2017).

Pérez, D. R. Restauración de ecosistemas áridos y semiáridos patagónicos: implementación desde un enfoque ecológico y social. En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (49-60). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Prach, K., Marrs, R., Pyšek, P., van Diggelen, R. Manipulation of Succession. *Linking Restauration and Ecological Succession*. pp. 121-149 (2007).

Raffaele, E., de Torres Curth, M., Morales, C. L., Kitsberger, T. (Eds.*) Ecología e historia natural de la Patagonia Andina: un cuarto de siglo de investigación en biogeografía, ecología y conservación*. 1a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara (2014).

Soria, N. D., Salomón, M. A., Rubio, C., Fernández, R. *Herbario Digital Secano de Lavalle*. Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial. LADyOT – IADIZA - CRICYT. Mendoza (2007).

Van andel, J., Aronson, J. (Eds.) *Restoration Ecology*. The New Frontier. Blackwell Science Ltd., Blackwell Publishing Company (2006).

Vargas, O. (Ed.). *Guía metodológica para la RESTAURACIÓN ECOLÓGICA del bosque altoandino*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología (2007).

Vibrans, H. (Ed.) *Malezas de México*. Sitio web www.conabio.gob.mx (2012).

Zuleta, G. A., Reichmann, L. G. Indicadores ambientales en ecosistemas semiáridos degradados por prácticas petroleras en norpatagonia: ¿matrices de impacto o comunidades vegetales? En Pérez, D. R., Rovere, A. E., Rodriguez Araujo, M. E. (Eds.) *Restauración ecológica en la diagonal árida de la Argentina* (152-179). Buenos Aires: Vázquez Mazzini (2013).

Zuleta, G., Escartín, C. Regeneración post-disturbio en ambientes degradados por la actividad petrolera en Nor-Patagonia. En Dalmasso, A. D. (Ed.) *Experimentia 4. Revista de Transferencia Científica*. (105 – 112). IADIZA – CONICET (2014).

VALIDACIÓN DE LOS ESTIMADORES DE PRECIPITACIÓN SATELITAL IMERG Y GSMAP EN 6 DEPARTAMENTOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

Juan Guillermo Barberis[a], Mariana Barrucand[bc]

[a]*Departamento de Educacion Agropecuaria, FAUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Departamento de Ciencias de la Atmosfera y los Oceanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*
[c] *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires,*

e-mail: barberis@agro.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se propuso validar datos de precipitación diaria obtenida de los estimadores de precipitación satelital IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) producto final, y GsMap (Global Satellite Mapping of Precipitation product) en algunas localidades de referencia de la región centro y norte de la Pampa Húmeda argentina. Ambos productos integran la precipitación ocurrida entre las 00:00 UTC y 23:59 UTC. Dado que la precipitación diaria observada en las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) consideran el total de agua caída entre 12:00 UTC y las 11:59 UTC del día siguiente, se consideraron datos horarios IMERG y se realizó una integración de los mismos dentro de dicho rango horario a fin de obtener un producto equivalente al registro de precipitación diaria del SMN. Las métricas estadísticas utilizadas para comparar los productos satelitales respecto a la variable observada mostraron una mayor concordancia al utilizar datos diarios de IMERG sobre los datos diarios de GsMap, aunque este resultado no resultó generalizado con todos los estadísticos estudiados. Al trabajar con datos IMERG integrados de 12:00 UTC a 11:59 UTC, coincidentes con los horarios de registro de datos en las estaciones meteorológicas bajo estudio, todos los estadísticos e índices mejoraron sensiblemente respecto a los productos diarios antes mencionados. Esto pone de manifiesto la buena representación de la precipitación del producto IMERG, y la importancia de considerar el horario de integración de la precipitación cuando se trabaja con fuentes múltiples de información (satelitales y observadas)

Palabras Clave: Lluvia, Mediciones, GPM, JAXA, Teledetección

INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones juegan un rol importante en la producción agropecuaria de secano como es el caso de la región pampeana. De hecho, la disponibilidad hídrica constituye uno de los tres elementos abióticos fundamentales en la producción agropecuaria. Su análisis a través de distintos índices es fundamental en el estudio del ciclo productivo. (Demario y Pascale 2011).

La forma tradicional de realizar los estudios de las precipitaciones es a través de los registros de pluviómetros ubicados en estaciones meteorológicas terrestres, pero, aunque se cuenta con una vasta red de estaciones meteorológicas que pueden proveer de dicha información (de tipo convencionales y más recientemente automáticas), su distribución no es homogénea y en ocasiones se registran datos faltantes y errores de medición.

Los productos de estimación de precipitación derivados de información satelital resultan una alternativa para su uso en la problemática anteriormente planteada. Estos productos son de cobertura global y se encuentra grillados con resoluciones que llegan a 0.1°.

El producto IMERG (Huffman et al 2015, 2019) (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) es un algoritmo para la estimación de precipitación multi satélite producido por el equipo GPM en los EEUU. Este producto es derivado de diversos sensores de microondas e infrarrojos pasivos de la constelación GPM (productos IMERG Early e IMERG Late), como así también de datos de estaciones terrestres (Producto IMERG Final). Estos productos son producidos con una resolución temporal de media hora, los que a su vez se agrupan para generar productos diarios y mensuales. Los productos diarios se generan integrando los productos de media hora entre las 00:00 UTC y las 23:59 UTC, lo que difiere del período considerado en el registro de precipitación diaria a partir del pluviómetro, que es desde las 12 UTC hasta las 12 UTC del día siguiente

El producto Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMap, Okamoto et al. 2005), es un algoritmo desarrollado por la agencia espacial japonesa (JAXA por sus siglas en ingles). Al igual que el caso anterior, es un producto derivado de diversos satélites, con una resolución horaria que se integra en productos diarios, semanales y mensuales. Los productos diarios consideran los datos de precipitación entre las 00:00 y las 23:59 UTC.

El objetivo de este trabajo fue realizar una validación de los productos diarios IMEREGD_F y GSMapD, como así también los productos IMERGH_F de media hora, integrados desde las 12 hs UTC y las 11:59 hs UTC del día siguiente, que se corresponden con los obtenidos en estaciones meteorológicas convencionales, que en general miden desde las 9 hora local hasta las 9 hora local del día siguiente.

DATOS Y METODOS

Se trabajó con datos de precipitación diaria de 6 estaciones meteorológicas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicadas en la porción centro y norte de la Región Pampeana, para el periodo junio de 2000 a diciembre de 2018 (Fig. 1)

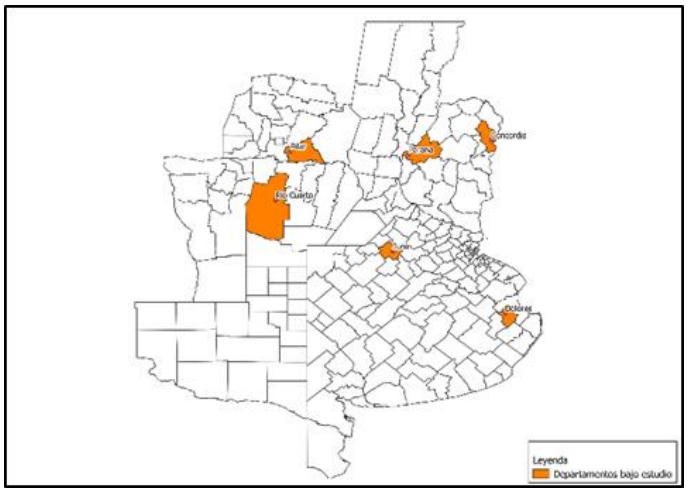


Figura 1. Estaciones analizadas en el presente estudio.

 ISBN 978-987-1323-91-3

Por su parte se trabajó con datos de precipitación estimados por los productos diarios IMERG (Final Run) y GSMap, considerando los pixeles en los que se encontraba la estación meteorológica convencional. Se trabajó también con datos de precipitación derivados de productos IMERG (Final Run) de media hora que fueron integrados desde las 12 hs UTC y las 12 hs UTC del día siguiente.

Se compararon los distintos productos satelitales respecto de las observaciones a partir de distintos estadísticos, siguiendo la metodología detallada en Hobouchian et al (2017). Los estadísticos considerados fueron la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación (CORR). El RMSE proporciona una medida del valor medio de los errores de la estimación. El BIAS representa la diferencia sistemática entre los conjuntos de datos que se comparan (sobreestimación o subestimación). Debe considerarse que una puntuación igual a cero no implica una correspondencia perfecta, ya que los errores se pueden compensar, resultando un sesgo igual a cero. El CORR representa el grado de asociación lineal entre la estimación y las observaciones. Es una métrica sensible a valores atípicos.

Se calcularon también los estadísticos categóricos que miden la correspondencia entre la ocurrencia de precipitación estimada y observada para los umbrales de 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20 y 50 mm, clasificando en acierto (A) si la precipitación observada y estimada está por encima del umbral; sorpresa (S) que corresponde a la precipitación observada por encima del umbral y estimada por debajo; y falsa alarma (F) que corresponde a la precipitación estimada por encima del umbral y observada por debajo. A partir de estos datos se calcularon los índices:

Bias Score (BIASS): con un puntaje perfecto de 1, mide la relación entre la frecuencia de los eventos estimados por los satélites y la frecuencia de eventos observados, indicando si las estimaciones tienen una tendencia a eventos de estimación insuficiente (BIASS<1) o de estimación excesiva (BIASS>1). No mide qué tan bien se corresponden las estimaciones con las observaciones. Solo mide las frecuencias relativas.

Equitable Threat Score (ETS), con un puntaje perfecto de 1, mide la fracción de eventos correctamente estimados, considerando un número de eventos aleatorio

Probabilidad de detección (POD), con un puntaje perfecto de 1 mide la fracción de aciertos observados que se pronosticaron correctamente. Sensible a los aciertos no tiene en cuenta las falsas alarmas.

Falsas Alarmas (FAR), con un puntaje perfecto de 0 y un rango de 0 a 1, mide la fracción de eventos estimados (aciertos y falsas alarmas) que en realidad no ocurrieron. Este índice no tiene en cuenta los eventos ocurridos y no pronosticados (sorpresas).

Todos los índices fueron calculados considerando los distintos productos satelitales y la precipitación medida en pluviómetro, correspondientes a las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla I muestra el total de Precipitaciones observadas y estimadas por los distintos métodos por año y para el total del periodo (1 junio de 2000 al 31 de diciembre 2018).

Tabla I. Total de precipitaciones observadas en las distintas estaciones meteorológicas para el total del periodo y por año, y total estimado según los distintos algoritmos. PP: precipitaciones observadas, IH: precipitaciones estimadas IMERGH_FR de media hora integradas desde las 12 hs UTC a las 11:59 UTC del día siguiente, ID: precipitaciones estimadas IMERGD_FR de media hora integradas desde las 0 hs UTC y las 23:59 UTC. GD: precipitaciones estimadas GSMap integradas desde las 0 hs UTC y las 23:59 UTC.

Concordia				
	PP	IH	ID	GD
2000	726.7	659.3	659.3	516.3
2001	1740.6	1603.7	1603.2	1493.2
2002	2386.9	2210.6	2210.8	1950.0
2003	1571.4	1466.4	1466.2	1582.8
2004	949.6	867.3	862.4	894.6
2005	1661.7	1413.0	1432.7	1497.5
2006	1134.7	1081.5	1077.9	854.3
2007	1491.8	1377.8	1377.9	1356.4
2008	837.2	750.7	750.8	665.1
2009	1542.2	1394.5	1390.3	1323.3
2010	1343.5	1212.1	1211.0	1179.9
2011	1250.9	1183.4	1184.4	1036.7
2012	1732.6	1613.3	1613.5	1366.6
2013	1062.8	1036.6	1036.1	976.2
2014	1778.2	1696.6	1696.5	1440.4
2015	1714.0	1668.6	1668.8	1567.3
2016	1716.2	1587.9	1587.9	1621.7
2017	1907.7	1634.7	1634.7	1843.8
2018	1531.7	1312.9	1312.9	1216.6
Total	**28080.4**	**25770.9**	**25777.3**	**24382.7**

Parana				
	PP	IH	ID	GD
2000	632.0	719.3	719.4	592.5
2001	1218.4	1306.8	1307.3	1148.4
2002	1491.9	1530.5	1530.4	1323.3
2003	1316.1	1409.1	1409.2	1177.1
2004	1029.7	979.8	978.6	701.4
2005	1161.6	1202.0	1246.0	1168.9
2006	1199.2	1291.7	1300.3	1052.2
2007	1289.6	1391.5	1390.9	1113.8
2008	687.3	719.2	730.2	524.2
2009	1350.6	1249.4	1259.3	1003.2
2010	1221.8	1180.5	1180.9	931.5
2011	1038.1	1250.1	1250.5	1058.8
2012	1324.4	1608.1	1608.6	1191.6
2013	1000.6	1022.1	1021.7	918.0
2014	1310.9	1507.7	1507.4	1144.2
2015	1160.1	1331.4	1330.7	953.5
2016	1346.3	1588.1	1578.3	1002.6
2017	1170.3	1449.4	1459.0	1124.9
2018	1060.4	1341.2	1341.2	803.6
Total	**22009.3**	**24077.9**	**24149.9**	**18933.7**

Río Cuarto				
	PP	IH	ID	GD
2000	325.5	365.4	365.0	377.5
2001	863.6	815.4	811.0	702.1
2002	844.5	824.1	828.5	668.4
2003	596.4	592.2	592.2	525.8
2004	957.2	953.3	917.5	900.4
2005	805.2	673.5	692.7	701.4
2006	853.1	852.4	859.4	922.3
2007	834.6	823.8	824.1	691.6
2008	1012.7	896.3	894.2	925.4
2009	637.6	643.6	667.0	552.4
2010	655.3	679.0	697.0	631.1
2011	778.9	724.8	724.8	607.4
2012	928.6	964.8	964.8	1117.0
2013	776.6	756.4	756.0	881.6
2014	879.5	898.4	896.1	784.8
2015	976.1	1058.6	1060.8	830.0
2016	748.7	983.5	936.0	919.1
2017	560.9	788.0	832.2	900.3
2018	648.7	702.1	705.8	802.4
Total	14683.7	14995.6	15025.1	14441.0

Pilar				
	PP	IH	ID	GD
2000	333.9	396.1	395.9	355.9
2001	1034.2	1056.4	1056.3	814.6
2002	903.7	852.4	853.7	702.9
2003	667.2	843.7	832.6	713.6
2004	723.7	770.1	739.7	688.7
2005	823.0	831.2	858.2	923.4
2006	980.4	898.9	909.9	759.8
2007	645.7	769.2	761.6	664.2
2008	627.7	787.7	773.5	745.3
2009	**373.5**	594.5	601.4	525.5
2010	552.3	764.0	767.9	651.8
2011	776.0	811.8	796.4	715.1
2012	740.0	881.9	868.1	813.2
2013	673.0	654.7	661.3	706.6
2014	773.9	873.3	880.1	610.0
2015	847.6	1062.7	1075.6	1014.2
2016	791.9	982.7	981.8	930.9
2017	669.1	782.8	736.4	693.4
2018	528.8	561.9	622.0	701.7
Total	13465.6	15176.0	15172.4	13730.8

Tabla I. (continuación)

Dolores				
	PP	IH	ID	GD
2000	542.5	571.3	570.3	615.7
2001	1196.2	1413.6	1414.1	1277.3
2002	1277.6	1604.6	1604.6	1600.7
2003	1008.0	1085.3	1084.9	1091.8
2004	828.5	908.5	905.7	886.5
2005	902.0	941.2	941.9	912.5
2006	1023.2	1016.9	1019.7	907.9
2007	938.2	997.0	992.0	847.3
2008	758.3	752.5	758.0	634.7
2009	831.2	985.1	960.5	863.1
2010	1125.3	1201.4	1203.7	1015.6
2011	669.8	832.1	832.3	788.1
2012	1242.6	1380.5	1380.4	1386.3
2013	645.5	851.8	851.3	928.0
2014	1404.8	1733.5	1731.4	1557.8
2015	1066.0	1026.4	1027.2	1008.6
2016	802.4	925.4	925.3	1170.9
2017	1040.0	1190.4	1190.3	1283.3
2018	1151.6	1493.0	1491.5	1469.1
Total	18453.7	20910.5	20885.1	20245.2

Junin				
	PP	IH	ID	GD
2000	463.2	501.6	501.1	539.3
2001	1786.7	1677.7	1678.0	1073.1
2002	1320.9	1505.9	1505.3	1122.1
2003	1021.6	1077.1	1077.2	748.2
2004	961.2	978.2	977.6	898.5
2005	820.1	888.3	887.9	824.6
2006	1116.3	1154.6	1163.1	913.1
2007	1112.8	1091.0	1090.2	846.5
2008	745.7	629.1	759.8	720.2
2009	1185.7	1129.7	1122.0	947.5
2010	946.4	897.7	907.1	751.9
2011	917.4	906.2	905.9	784.0
2012	1580.2	1451.5	1451.9	1428.0
2013	1006.2	918.1	918.3	833.1
2014	1638.4	1462.3	1453.5	1209.8
2015	1347.9	1418.6	1426.1	1160.9
2016	1107.9	1226.9	1199.0	1134.2
2017	1208.6	1410.9	1440.9	1161.0
2018	1233.8	1177.8	1177.2	956.6
Total	21521.0	21503.2	21642.1	18052.6

Si bien las bases de datos no registraban ningún tipo de faltante, se observa en la estación Pilar (Córdoba) un valor muy por debajo respecto a las estimaciones satelitales en el año 2009, valor que tampoco se condice con la precipitación observada en una estación meteorológica cercana (Manfredi INTA) con un registro de 655 mm ese año (valor extraído de http://siga2.inta.gov.ar/), que similar al de las estimaciones satelitales para la estación Pilar. Por este motivo es probable que haya habido algún tipo de error en el registro de precipitación observada de Pilar en ese año.

En términos generales, los totales de precipitación estimados por los distintos productos satelitales en el período total reflejan una buena correspondencia con las observaciones, especialmente, para los productos IMERG. El producto GSMap, refleja mayormente sobreestimaciones de los valores precipitación, alcanzando en una de las localidades estudiadas una diferencia máxima de 16.1% con respecto a la precipitación observada. El resto de las diferencias observadas fueron siempre menores a ese porcentaje.

Al evaluar las estimaciones de los productos satelitales considerando distintas métricas estadísticas (tabla II), se evidenció una mejor representación de la precipitación diaria estimada con el producto IMERGH_F, integradas de 12:00 a 11:59 UTC (IH), que tuvieron menor RMSE y mayor CORR que las estimadas con datos diarios, que tienen una integración de la información entre las 00:00 y las 23:59 UTC

Tabla II. Coeficientes estadísticos RMSE (mm), BIAS (mm) y CORR (Correlación) para los datos observados en las distintas estaciones meteorológicas y las series GSMap e IMerg. Período: 2003-2018.

RMSE			
	IH	ID	GD
Concordia_SMN	7.03	12.17	12.30
Parana_SMN	6.48	12.06	11.72
RíoCuarto_SMN	5.58	8.20	8.57
Pilar_SMN	5.19	8.42	8.29
Dolores_SMN	5.66	9.39	9.72
Junin_SMN	6.91	10.90	10.79

BIAS			
	IH	ID	GD
Concordia_SMN	-0.340	-0.339	-0.545
Parana_SMN	0.305	0.315	-0.453
RíoCuarto_SMN	0.046	0.050	-0.036
Pilar_SMN	0.252	0.251	0.039
Dolores_SMN	0.362	0.358	0.264
Junin_SMN	-0.003	0.018	-0.511

CORR			
	IH	ID	GD
Concordia_SMN	0.842	0.522	0.488
Parana_SMN	0.826	0.428	0.385
RíoCuarto_SMN	0.711	0.362	0.295
Pilar_SMN	0.787	0.395	0.335
Dolores_SMN	0.816	0.472	0.405
Junin_SMN	0.773	0.429	0.360

Hobouchian et al (2018) encontraron valores positivos de BIAS en la región centro-este de argentina (1.12 para los productos IMERG_ER e IMERG_LT y 2.52 para GSMap) al analizar el período abril 2015-abril 2018. En el estudio que aquí se presenta, que considera un período más extenso, se encuentran valores de BIAS menores, incluso negativos en algunos casos.

Los valores de correlaciones resultaron significativamente distintos de cero en todos los casos, pero se observan valores mucho más altos al trabajar con datos horarios integrados entre las 12 UTC y las 11:59 UTC del día siguiente (valores entre 0.71 y 0.84). Las correlaciones calculadas con los productos diarios resultaron inferiores, entre 0.36 y 0.52 en el caso de IMERGD_FR y entre 0.3 y 0.49 en el caso de GSMapD. Los resultados de IMERGD_FR diarios son compatibles con los encontrados por Badagian (2019), que trabajó con productos IMERG_FR en la cuenca de la represa Salto Grande encontrando valores de 0.47 a 0.51, y Raggio (2017) en la región del Comahue, con valores de correlación entre 0.24 y 0.5. Ovando et al (2018) encuentran valores levemente superiores para Córdoba en el periodo 2014-2017, entre 0.53 y 0.66. Houbuchian et al (2018), presentaron valores de correlación aún más altos (0.68) para productos IMERG_ER o IMERG_LT para estaciones de la misma región que las aquí analizadas, pero inferiores a los encontrados en este trabajo, para estimaciones con productos horarios IMERGH_FR.

Al analizar la ocurrencia de precipitación para distintos umbrales de precipitación (Fig. 2) se observó que a bajos umbrales (0,5 y 1 mm), el índice BIAS SCORE (BIASS) indicó sobreestimación en todas las estaciones, a excepción de Paraná con datos GSMap (GD). Para mayores umbrales, con límite de 50 mm, indicó subestimación en todos los casos.

Un resultado similar fue descripto por Salio et al (2015), analizando un periodo de 2 años en productos derivados de la misión TRMM (3B42 V6, V7 y RT y CMORPH). Por el contrario, Badagian (2019), en la cuenca de Salto Grande, encontró diferencias a altos umbrales con predicciones excesivas.

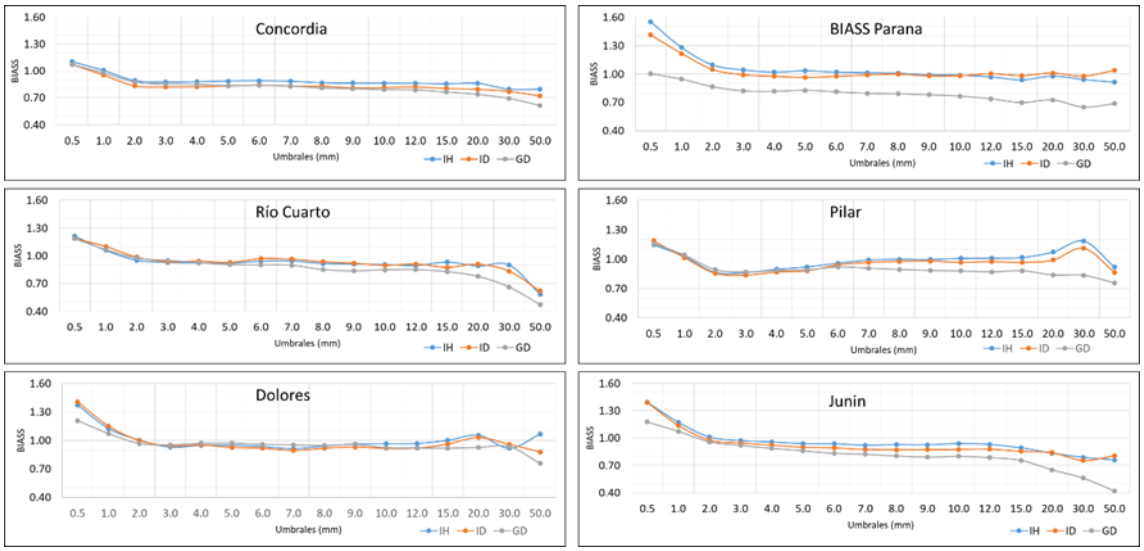


Figura 2. Índice BIAS SCORE para las distintas estimaciones de precipitación por estación meteorológica para el periodo 2000-2018.

 ISBN 978-987-1323-91-3

La probabilidad de detección ETS resultó claramente superior en el caso de utilización de datos horarios (Fig. 3), mientras que las probabilidades más bajas se observaron con el producto GSMapD. Lo mismo ocurrió con el índice POD (Fig. 4). Ambos índices disminuyen cuando se evalúan valores de precipitación más intensa.

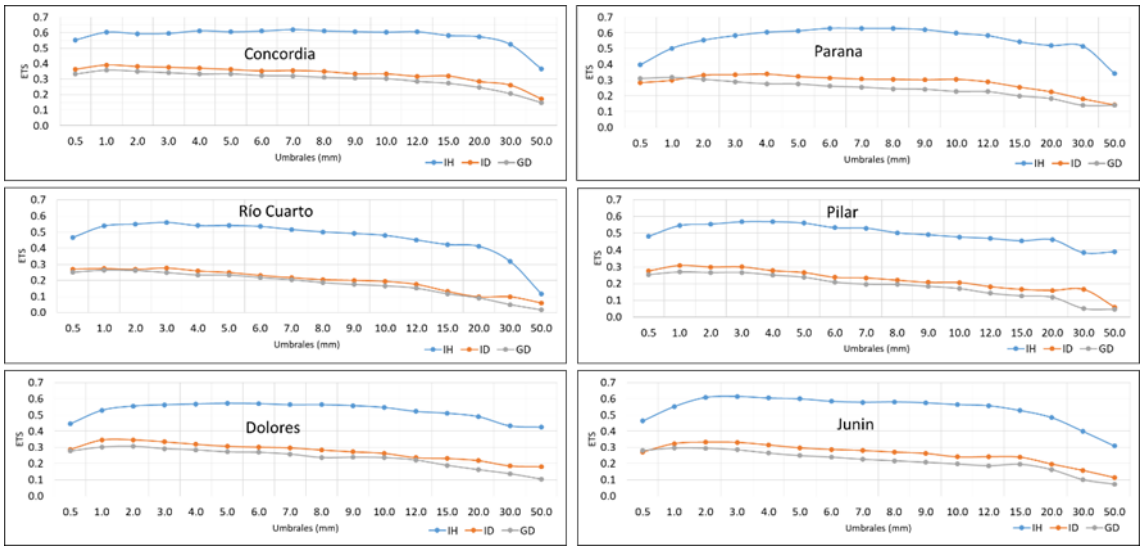


Figura 3. Índice ETS para las distintas estimaciones de precipitación por estación meteorológica para el periodo 2000-2018.

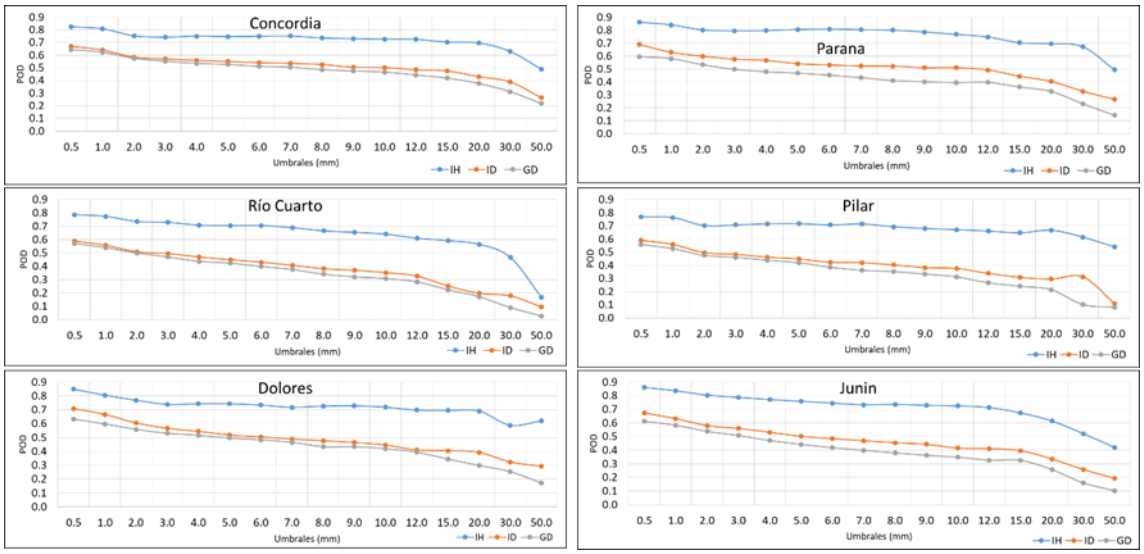


Figura 4. Índice POD para las distintas estimaciones de precipitación por estación meteorológica para el periodo 2000-2018.

Finalmente, al analizar las falsas alarmas (Fig. 5), se encuentra que éstas aumentan más fuertemente al considerarse umbrales de precipitación superiores a los 20 mm y, en menor medida, inferiores a 2 mm. En todas las estaciones, y al igual que se venía reflejando con el resto de las métricas, el producto derivado a partir de información horaria reflejó los mejores resultados, con una menor proporción de falsas alarmas

 ISBN 978-987-1323-91-3

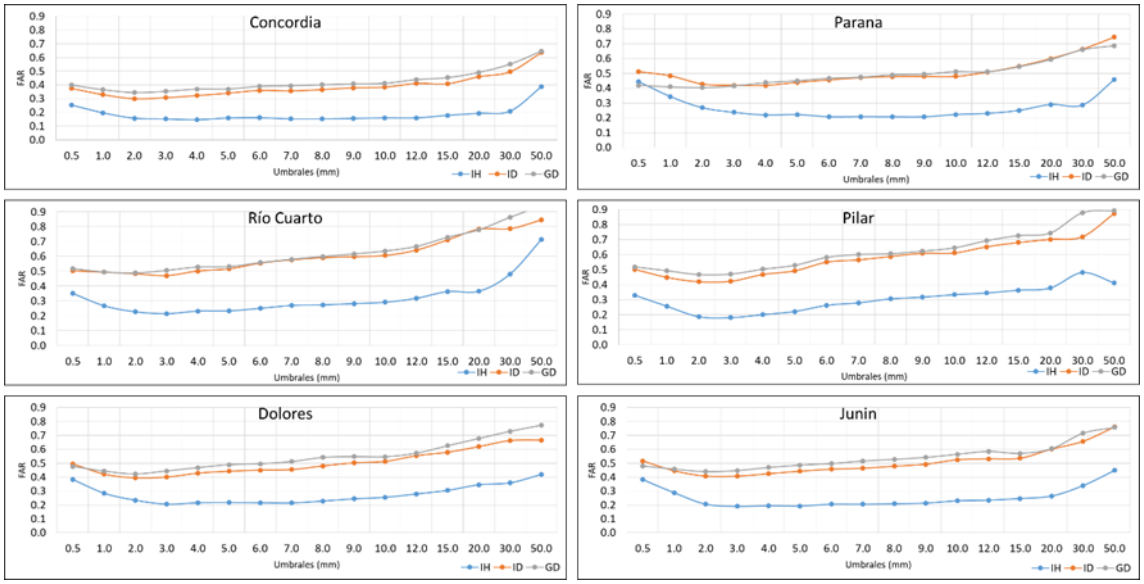


Figura 5. Índice FAR para las distintas estimaciones de precipitación por estación meteorológica para el periodo 2000-2018.

CONCLUSIONES

Los resultados aquí encontrados muestran la diferencia que existe al trabajar con productos diarios IMERGD_FR o GSMapD, que integran los datos de precipitación entre las 0 UTC y 23:59 UTC, y los de datos horarios (o cada media hora como es el caso de los productos IMERGH_FR), que pueden integrase de manera de que haya una coincidencia horaria con la medición de precipitación que se realiza en las estaciones meteorológicas. Al igual que lo encontrado por Houbuchian et al (2018) al comparar los productos diarios, se encontró una mejor estimación de la precipitación por parte de los productos IMERGD_FR respecto a los GSMapD, aunque esto no quedó evidenciado en todas las métricas estadísticas evaluadas y en todas las estaciones. El estudio de comparación entre la precipitación estimada con el producto IMERGH_FR en el mismo período horario que el considerado para la observación en pluviómetro, evidenció una alta correspondencia entre ambas bases de datos, lo que demuestra la precisión de este tipo de productos, y la importancia de considerar el horario de integración de la precipitación cuando se trabaja con fuentes múltiples de información (satelitales y observadas).

Agradecimientos: este trabajo fue financiado por los proyectos PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023), UBACyT 20020220200111BA.

REFERENCIAS

Badagian J (2019) Validación del estimador de precipitación satelital IMERG en la región de la cuenca de aporte a la Represa de Salto Grande. Curso Información satelital: aplicaciones para el conocimiento de la atmósfera. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.

Colombani E. Behr S., González J., Salas J. Brandizi L. (2018). Validación de precipitaciones utilizando GSMap y observaciones a campo en la provincia de Chubut, Patagonia Argentina. Documentos INTA: https://inta.gob.ar/documentos/validacion-de-estimaciones-de-

precipitacion-utilizando-gsmap-y-observaciones-a-campo-en-la-provincia-de-chubut-patagonia-argentina.

Demario E., Pascale A. (2011). Cartas agroclimáticas de las regiones Pampeana, Chaqueña y Litoral de cultivo en secano (1941-1990). Revista Facultad de Agronomía Vol 31. N 3 Pag 65-183.

Houbouchian M. (2015). Estimaciones de precipitación por satélite en el área Subtropical de Sudamérica: análisis y validación. Tesis de Grado. Departamento de Ciencias de la Atmosfera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 111 pgs.

Houbouchian M., Skabar Y., Barrera D., Vila D., Salio P. (2017). Validación de la estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica hidroestimador. Revista Meteorológica. Vol 43 N 1 (19-37).

Houbouchian M., Skabar Y., Salio P., Viale M., Matsudo C. (2018) Evaluación de estimaciones de precipitación por satélite en el sur de sudamérica. XIII CONGREMET del 16 al 19 de octubre. Rosario Santa Fe Argentina.

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1-degree x 0.1 degree V06, Edited by Andrey Savtchenko, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accedido: [16/06/2020], 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1-degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Services Center (GES DISC), Accedido: [16/06/2020], 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06.

Okamoto K., Ushio T., Iguchi T., Takahashi, N., Iwanami K. (2005). The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 5. 3414 - 3416. 10.1109/IGARSS.2005.1526575.

Ovando G., Sayago S., Bellini Y., Bocco M. (2018). Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar precipitación en Córdoba (Argentina). X Congreso de Agroinfomática (CAI) – JAIIO 47. Buenos Aires Argentina.

Raggio G. (2017). Validación del estimador de precipitación satelital de alta resolución IMERG en la región del Comahue. Curso Sensoramiento de la atmósfera. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.

Ruiz J. (2009) Evaluación de diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones de precipitación CMORPH sobre Sudamérica. Revista Brasileira de Meteorologia, vol 24 n4 473-488.

Salio P., Houbouchian M., Skabar Y., Vila D. (2015). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gouge network. Atmospheric Research 163:146-161.

ANALISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN CUENCAS DE LLANURA DEL NORESTE DE BUENOS AIRES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL ARROYO LAS CONCHITAS

Sebastián I. Besteiro[ab], Fabio A. Montealegre Medina[bc], Adriana C. Guzmán Guaraca[bcd], Mariano Velázquez[a], Fernanda J. Gaspari[ab]

[a] *Fac. Cs. Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, ARGENTINA.*

[b] *Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), UNLP, ARGENTINA*

[c] *Becario/a doctoral CIC-PBA, ARGENTINA*

[d] *Facultad de Recursos Naturales (ESPOCH), ECUADOR e-*

mail: sebabesteiro@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

El estudio del cambio de usos del suelo desempeña un papel fundamental en la gestión integrada del recurso hídrico en cuencas hidrográficas del conurbano bonaerense. Estas áreas experimentan una transformación acelerada debido al crecimiento demográfico, la expansión urbana y el desarrollo económico. La cuenca del Arroyo Las Conchitas, situada en el noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se caracteriza por su rica y diversa composición geográfica, una ocupación que varía desde zonas agrícolas hasta sectores urbanizados, y por la ausencia de gradientes altimétricos de importancia. Esta variabilidad del paisaje influye en la calidad del agua y en la dinámica de los ecosistemas circundantes, planteando desafíos y oportunidades para la gestión sostenible del recurso suelo-agua-vegetación y la conservación del entorno. Con el objetivo de establecer un protocolo geoespacial de análisis multitemporal de la evolución de los usos del suelo en la cuenca, se implementó una clasificación de Machine learning en Google Earth Engine (GEE) que permitió definir las coberturas de uso del suelo para distintos períodos, con elevadas precisiones (índices general de 67% y kappa 64%), utilizando el algoritmo Random Forest sobre imágenes Landsat 8. Las clasificaciones obtenidas se procesaron en entorno QGIS 3.32, para la obtención de la cartografía y el análisis visual, y se trabajó con planillas de cálculo Excel 360, para definir las tasas de cambio de usos del suelo y las respectivas matrices de transición. La combinación de estas tecnologías y metodologías proporciona una perspectiva integral del cambio de coberturas en la zona de estudio. La precisión de las clasificaciones, junto con la capacidad de análisis que aportan las herramientas geomáticas, brindan una base sólida para comprender la evolución del uso del suelo, evaluar su impacto y proponer estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos para la planificación territorial.

Palabras Clave: Cambio de Uso del suelo, Cuencas hidrográficas, Machine learning, SIG.

INTRODUCCIÓN

El estudio del cambio de usos del suelo desempeña un papel fundamental en la gestión integrada del recurso hídrico en cuencas hidrográficas del conurbano bonaerense. Estas áreas experimentan una transformación acelerada debido al crecimiento demográfico, la expansión urbana y el desarrollo económico. La cuenca del Arroyo Las Conchitas (ALC), posee una superficie de 123 km^2 y se encuentra situada en el noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (ver Fig. 1).

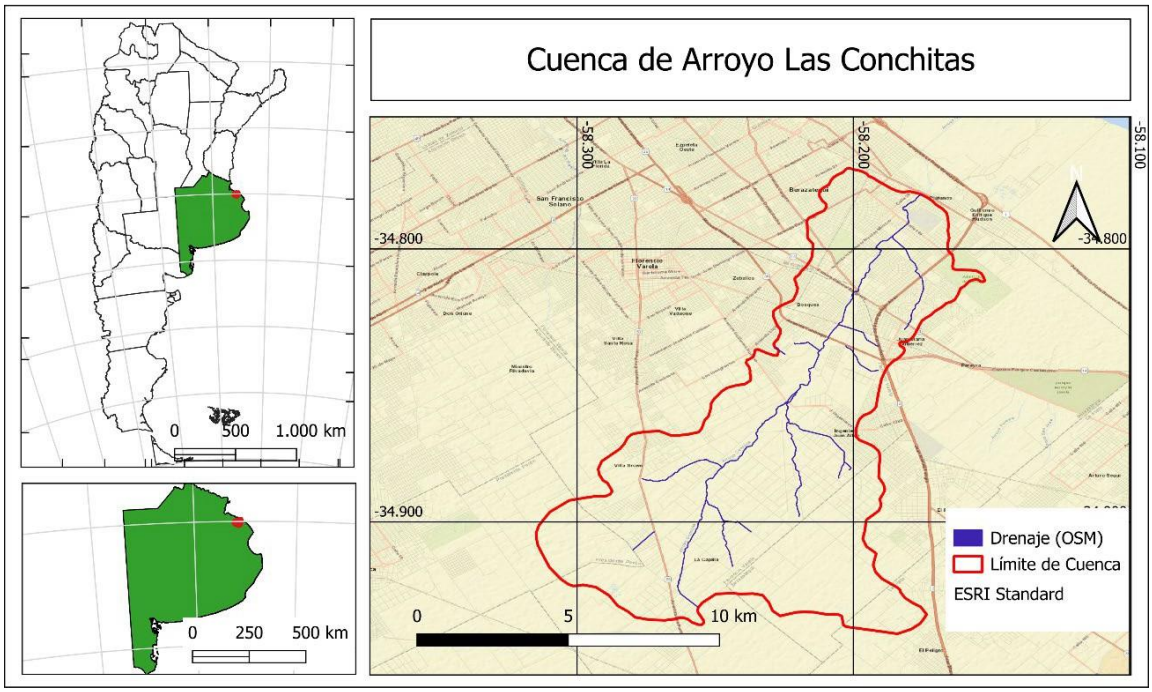


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Las Conchitas. Provincia de Buenos Aires.
Argentina.

El clima es subhúmedo-húmedo mesotermal con precipitaciones modulares anuales registradas, en las estaciones Ezeiza y La Plata Observatorio (1973-2014 y 1909-2007), comprendidas entre 928 mm y 1042 mm. La evapotranspiración real se calcula en 800 mm/año con excesos hídricos del orden de 243 mm anuales para la Estación La Plata Observatorio según la metodología de Thornthwaite - Mather, (1957) (Trovatto et al, 2015).

La cuenca del ALC se caracteriza por su rica y diversa composición geográfica y de uso del suelo, cuya ocupación varía desde zonas agrícolas hasta sectores urbanizados. Esta variabilidad y la ausencia de gradientes altimétricos genera diversos paisajes de uso antrópico, y el hecho de estar limitada al este por la planicie del río de La Plata, influye en la dinámica de los ecosistemas circundantes, planteando desafíos y oportunidades para la gestión sostenible del recurso suelo-agua-vegetación y la conservación del entorno.

El objetivo del estudio fue establecer un protocolo geoespacial de análisis multitemporal de la evolución de los usos del suelo en la cuenca del Arroyo Las Conchitas.

El mismo se realizó mediante la utilización de herramientas informáticas geoespaciales, de libre acceso, vinculadas al sensoramiento remoto y análisis de imágenes satélite e información georreferenciada.

MÉTODOS

La metodología aplicada consistió en el desarrollo de un código (script) en lenguaje Visual Basic para obtener de forma automatizada, casi inmediata y sin necesidad de contar con un procesador muy robusto, una clasificación decádica del cambio de uso del suelo a nivel de cuenca hidrográfica. Para ello, se implementó el uso de la Plataforma geomática Google Earth Engine (GEE, https://earthengine.google.com/) basada en la nube web, que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite. Dado que es de uso libre, cuenta con un gran repositorio de imágenes, la capacidad de proceso de Google y una gran comunidad de usuarios.

Se trabajó con información cartográfica de uso del suelo antecedente y productos elaborados en formato vectorial (*.shp). Los mismos fueron adecuados y actualizados con apoyo en el programa QGis, en función de un trabajo de fotointerpretación sobre imágenes de alta resolución provenientes del Google Earth y vuelos fotogramétricos con dron. Este trabajo permitió establecer los puntos de representativos de los distintos usos del suelo, para los dos momentos testigos: año 2013 y 2023, con el fin de contar con áreas representativas para el entrenamiento y validación de las clasificaciones supervisadas.

Para las clasificaciones del uso del suelo en estos dos períodos, se trabajó integrando el GEE con herramientas de herramienta de Machine Learning, como ser Super Vector Machine (SVM), Smile Card (SC) y Random Forest (RF) (Palacio et al, 2002), aplicado en imágenes ópticas de media resolución provenientes de los satélites Lansat 8 y Sentinel 2. Para el armado de los códigos, se visitaron una gran variedad de foros y recursos web a fin de hacer correr los códigos, ajustar los protocolos y generar índices.

Obtenidas las distintas clasificaciones, se adoptó el mayor valor de exactitud e índice Kappa (Landis y Koch, 1977), y se exportó al QGis en donde se adaptó al formato vectorial shp. para su manipulación y obtención de las superficies por cobertura. Estos resultados fueron trabajados en hojas de cálculo para cuantificar las tasas de cambio de cobertura, aplicando la ecuación de FAO (1996) (Ver Ec. 1) y para la obtención de las Matrices de Cambio.

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/n} - 1$$

Ecuación 1

donde δ es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100), S1 y S2 son las superficies correspondientes a las fechas 1 y 2, respectivamente, y n, es el número de años entre las dos fechas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados logrados por clasificaciones geoespaciales de uso del suelo para los dos años estudiados, se analizaron los valores de ajuste de aceptables de índice Kappa, lo cual permitió optar por el algoritmo de mejor respuesta. En la Tabla I se visualizan los resultados alcanzados por los tres algoritmos utilizados, siendo el de Random Forest, proveniente del satélite Landsat 8, el que expresó mejores índices de exactitud general y Kappa, siendo de 0,643 y 0,586, respectivamente para año 2013, y de 0,688 y 0,636 para el 2023, respectivamente.

Tabla I. Algoritmos utilizados y valores de exactitud general e índice Kappa.

	2013		**2023**	
Algoritmo	**Exactitud general**	**Índice Kappa**	**Exactitud general**	**Índice Kappa**
Random Forest	0,643	0,586	0,688	0,636
Suport Vector Machine	0,472	0,391	0,607	0,536
Classification and Regression Tree	0,512	0,435	0,647	0,589

Los usos del suelo reconocidos en la cuenca del ALC fueron: Rural Extensivo, Rural intensivo, Urbano, Semi urbano, Forestación, Recreativo, Superficie artificial y Cuerpo de agua, todos ellos considerados de bibliografía antecedente (CFI, 2011).

En las Fig.2 se muestra la zonificación de uso del suelo lograda con el procesamiento GEE aplicando RF, donde se presentan cada uno de los usos del suelo detectados para el año 2013, donde se interpreta que la superficie de uso rural alcanza el 43,7% de la cuenca y la zona urbana el 41,2%, siendo ambas equivalentes. Las zonas forestales y otros usos ocupan el 15,1%.

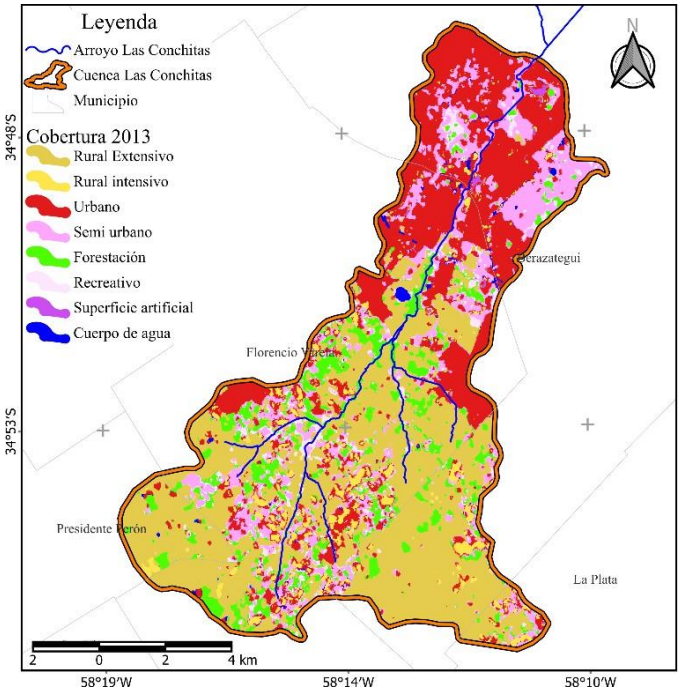


Figura 2. Zonificación de uso del suelo para 2013.

En la Fig. 3 se presenta la distribución de los usos del suelo en el año 2023, lograda con RF en GEE, identificando un retroceso del uso rural (37,5%) debido al avance de la urbanización con un predominio del 45,02% de la cuenca. Las áreas forestadas se han mantenido constantes y aumentó el área recreativa en un 2,5%. También aumentaron las áreas impermeables, debido al crecimiento del área industrial.

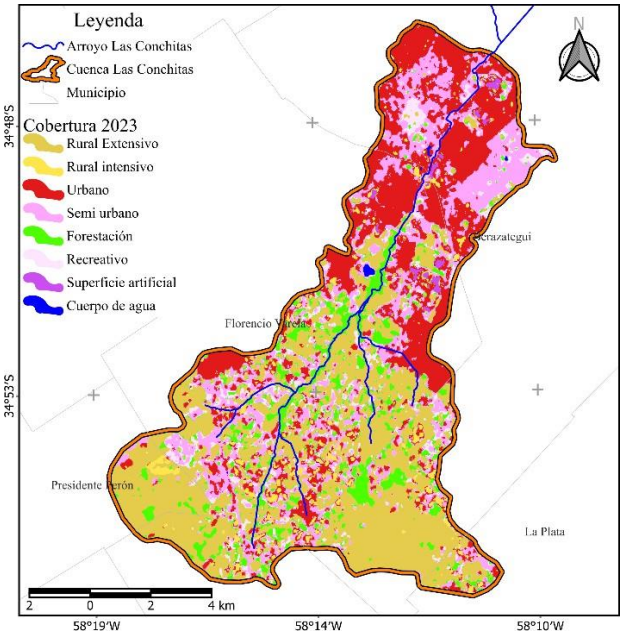


Figura 3. Zonificación de uso del suelo para 2023.

Con los resultados alcanzados en la zonificación de cada año en estudio, se obtuvo la tasas de cambio entre las coberturas expresando el Cambio de Uso del Suelo (CUS), como se muestra en la Fig. 4, lo cual indica ganancias vs perdidas de cada clase de uso.

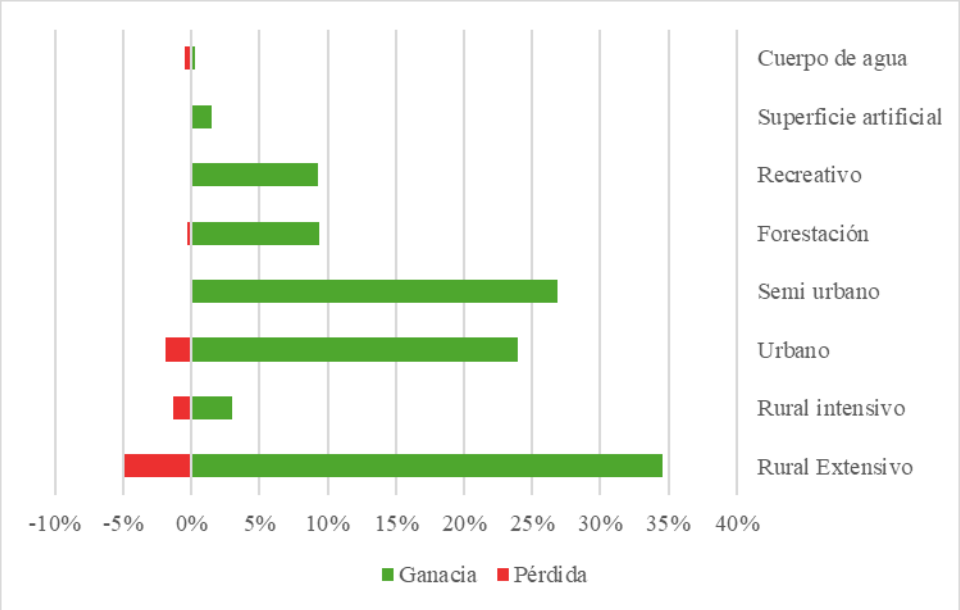


Figura 4. Cambio de uso del suelo entre 2013 - 2023.

En la Tabla II se muestra la matriz de CUS por unidad de superficie, la cual representa un recurso muy útil para interpretar los cambios de uso del suelo de un período a otro. Los valores en las celdas indican el total de hectáreas que se transforman entre las diversas formaciones. Al final se incluyen las tasas de cambio expresadas en porcentaje. Si se observan las distintas superficies a nivel de "fila", se puede interpretar que esa cobertura, de un período al siguiente, ha modificado su uso para convertirse al uso correspondiente a la "vertical". Un ejemplo de esto lo muestra la cobertura "rural extensiva", que es la más afectada en el cambio de la superficie total a usos. En las celdas grises se muestra la superficie sin cambio.

Tabla II. Matriz de cambio (ha) de uso del suelo para 2013 – 2023.

		Superficie de ocupación 2023 (ha)								
		Rural extensivo	Rural intensivo	Urbano	Semiurbano	Forestación	Recreativo	Superficie artificial	Cuerpo de agua	**Total 2013**
Superficie de ocupación 2013 (ha)	Rural extensivo	**3269**	83	216	486	430	313	10	1	***4808***
	Rural intensivo	88	**118**	152	130	9	15	8	2	***521***
	Urbano	128	104	**2217**	590	23	46	29	8	***3144***
	Semiurbano	170	43	260	**1079**	84	204	33	4	***1877***
	Forestación	402	4	19	130	**518**	103	2	1	***1179***
	Recreativo	143	5	33	125	74	**147**	2	1	***528***
	Sup, artificial	0	2	11	0	0	0	**32**	0	***45***
	Cuerpo de agua	10	5	10	40	2	3	0	**18**	***89***
	Total 2023	***4210***	***365***	***2918***	***2579***	***1140***	***831***	***115***	***34***	***12192***

 ISBN 978-987-1323-91-3

En coincidencia con Trovatto et al (2015) el cambio de uso del suelo por la urbanización provoca un cambio en el uso general de la cuenca, incidiendo, además, en la calidad de agua. Por ello, se puede establecer que un riguroso control de los niveles de calidad y tipo de descargas tanto industriales, como cloacales, mejorará sustancialmente la calidad del agua superficial del ALC y de las cuencas vecinas.

CONCLUSIONES

La combinación de tecnología geoespacial y metodología de interpretación de imágenes satelitales, con apoyo en bibliografía antecedente, proporciona una perspectiva integral del cambio de coberturas en la cuenca del ALC.

La precisión de las clasificaciones, junto con la capacidad de análisis que aportan las herramientas geomáticas web, brindan una base sólida para comprender la evolución del uso del suelo, evaluar su impacto y proponer estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos para la planificación territorial.

Particularmente en la cuenca ALC se observa un incremento significativo con el avance de la urbanización y la impermeabilización debido a la incorporación de áreas industriales, indicando el presente estudio la tendencia de diversos problemas ambientales en una región. Entre las principales causas dirigidas por el ser humano, se encuentran los proyectos inmobiliarios, la expansión sobre de terrenos agrícolas, el crecimiento de industrial y, por último, pero no menos importante, es el cambio en un corto período (10 años) que lleva como consecuencia tanto la degradación de áreas adyacentes a cursos de agua como del cambio a otros usos de suelos, tales como matorrales o agropecuarios.

REFERENCIAS

CFI. Plan piloto de gestión de cuencas hídricas de pequeñas dimensiones. Cuencas arroyo Las Conchitas y Baldovinos, Provincia de Buenos Aires. Informe Final. Tomo II. http://biblioteca.cfi.org.ar/documento/plan-piloto-de-gestion-de-cuencas-hidricas-de-pequenas-dimensiones-cuencas-arroyo-las-conchitas-y-baldovinos-provincia-de-buenos-aires/ (2011).

FAO. Foret resources assessment. Survey of tropical forest cover and study of change rocesses. Number 130, 152 pp. Roma. (1996).

Landis J, Koch G: The measurement of observer agreement for categorical data.
Biometrics. 33: 159-74. (1977).

Palacio, J. L., Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. D., Saucedo, R. M., Alcántara, P. C., & Ezcurra, E. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta ecológica, (62), 21-37. (2002).

Trovatto, M. M., Alvarez, M. d. P., Cipponeri, M., Salvioli, M. L., & Calvo, G. Impacto antrópico sobre el recurso hídrico en cuencas del noreste de la provincia de Buenos Aires. Web https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/48008 (2015).

AVANCES EN LA GESTIÓN SUSTENTABLE DEL RECURSO HÍDRICO EN CUENCAS DEL NORESTE DE BUENOS AIRES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL ARROYO EL PESCADO

Sebastián I. Besteiro[ab], María Isabel Delgado[ace], Claudia V. Di Lello[de], y Eleonora S. Carol[de]

[a] *Fac. Cs. Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, ARGENTINA.*
[b] *Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), UNLP, ARGENTINA*
[c] *División Ficología, Fac. de Cs. Nat. y Museo, UNLP, ARGENTINA*
[d] *Centro de Investigaciones Geológicas, UNLP-CONICET, La Plata, ARGENTINA*
[e]. *CONICET, ARGENTINA*

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

RESUMEN

El conocimiento de la dinámica del agua es esencial para el desarrollo socioeconómico de un territorio y la correcta gestión del recurso hídrico resulta indispensable en términos de la sostenibilidad de cualquier sistema natural. La cuenca del arroyo El Pescado, declarada paisaje protegido de interés provincial, representa una típica cuenca de llanura que desemboca al Río de la Plata y afecta a los partidos de La Plata, Berisso y Magdalena. El objetivo del estudio fue caracterizar hidrológicamente dicha cuenca a fin de avanzar en el conocimiento de la dinámica hídrica de las cuencas del Noreste de Buenos Aires y propender a la gestión del recurso hídrico superficial y subterráneo somero. Para ello, fue necesario la determinación batimétrica sobre distintos puntos del cauce a fin de obtener los perfiles de éste; la elección de una curva de masa de lluvia media de 72 mm, y la confección de la cartografía correspondiente al límite de cuenca, red hidrográfica superficial, usos/coberturas del suelo y grupos hidrológicos en función de las características edáficas en entorno GIS. Estas capas se trabajaron con un modelo hidrológico de tipo desagregado, el HEC-HMS, a fin de obtener el escurrimiento superficial y el tránsito de avenida en dicha cuenca. Los hidrogramas de avenida obtenidos confirman la fragilidad de estos ambientes ante un evento de lluvia, en donde los caudales líquidos ascienden a valores superiores al 34% de la lluvia acumulada, a pesar de tratarse de una cuenca de llanura. Este tipo de modelizaciones toma relevancia cuando se carece de registros pluviográficos específicos, ya que permiten obtener los hidrogramas correspondientes a los escurrimientos en función de las características morfológicas de la cuenca y el estudio de los cambios de uso del suelo, lo cual es esencial para la toma de decisiones respecto a la gestión del recurso.

Palabras Clave: Escurrimiento superficial, Uso del suelo, HEC-HMS

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la dinámica del agua es esencial para el desarrollo socioeconómico de un territorio (Alcamo et al., 2000) y la correcta gestión del recurso hídrico resulta indispensable en términos de la sostenibilidad de cualquier sistema natural (Cosgrove & Rijsberman, 2000).

La cuenca del arroyo El Pescado, se encuentra en la provincia de Buenos Aires a 15 km de la ciudad de La Plata y abarca una superficie de 348 km² (ver Fig. 1). Esta cuenca fue declarada paisaje protegido de interés provincial (Ley provincial 12247), y representa una típica cuenca de llanura que desemboca al Río de la Plata. Se trata de un territorio tripartito, que afecta a parte de los partidos de La Plata, Berisso y Magdalena.

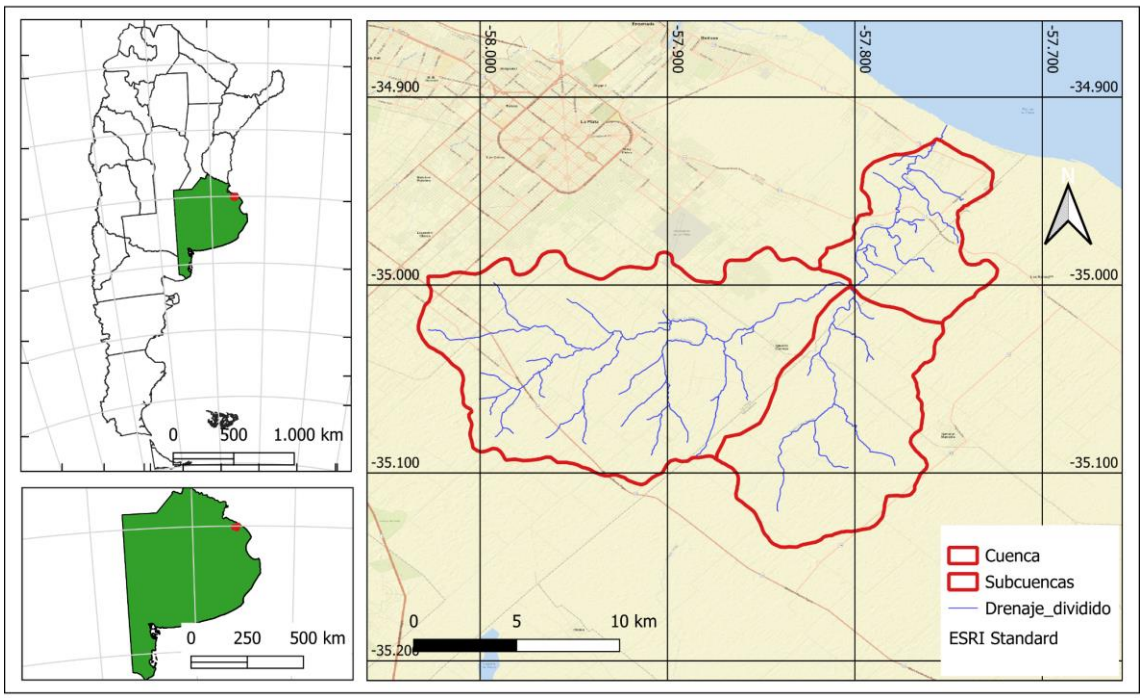


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del arroyo El Pescado.

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos naturales, es común el uso de modelos de simulación ya que proveen medios de extrapolación cuantitativa o predicción, que permiten simular estados de un sistema hidrológico real cuando no hay datos disponibles en el espacio o en el tiempo, y conocer el impacto de futuros cambios hidrológicos. Según el manual de usuario del HEC-HMS proporcionado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 2023), el modelo es capaz de realizar simulaciones hidrológicas tanto en escalas agregadas (cuencas enteras) como desagregadas (cuencas y subcuencas), lo que permite su aplicación en una variedad de contextos y niveles de detalle, y facilita el estudio de sistemas naturales complejos y la predicción de su comportamiento hidrológico en pos de realizar un correcto uso del recurso hídrico.

El objetivo del estudio fue caracterizar hidrológicamente la cuenca del arroyo El Pescado a fin de avanzar en el conocimiento de la dinámica hídrica de las cuencas del Noreste de la provincia de Buenos Aires y propender a la gestión del recurso hídrico superficial y subterráneo somero.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de estudio

En el noreste de la provincia de Buenos Aires se desarrollan numerosas cuencas de llanura con distinto grado de afectación antrópica, producto de diversos procesos de cambios en el uso del suelo (Delgado y Carol, 2018). En particular, en la cuenca del arroyo El Pescado, las principales modificaciones se basan en la conversión de áreas de pastizal natural hacia el tipo de uso urbano y agrícola (principalmente agricultura bajo invernáculo) (Delgado et al., 2020). En esta región el clima se caracteriza como templado húmedo, con una temperatura media anual de 16 °C y una precipitación media anual de 1.025 mm (período 1970–2016). De acuerdo a Delgado et al. (2018), el balance hídrico anual para este período expresa una predominancia de la precipitación por sobre la evapotranspiración, a pesar de lo cual suelen ocurrir déficit hídricos entre los meses de noviembre y febrero.

La zona de cuenca media y alta se desarrolla sobre una planicie loéssica, con una elevación topográfica entre los 5 y 30 m snm, en tanto que la cuenca baja se ubica sobre la planicie costera del Río de la Plata, con cotas menores a los 2,5 msnm (Carol et al., 2012). Los cursos de agua tienden a estar bien definidos en el sector de la cuenca alta, (con un ancho menor a 5m), en tanto que aguas abajo puede extenderse notablemente (llegando a 500 m de ancho), y, posteriormente en la planicie costera el curso de agua se torna divagante dentro del área de bañado (Auge, 2005). La recarga de acuíferos ocurre por infiltración del agua de lluvia preferentemente en la zona de cuenca alta y media debido a la mayor permeabilidad de los sedimentos loéssicos (Kruse et al., 2013).

Modelización hidrológica

Para la caracterización hidrológica de la cuenca se utilizó el software HEC-HMS 4.11, creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (Hydrologic Engineering Center, 2017). Se trata de un modelo determinístico de evento, que provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y también tránsito de caudales a fin de obtener el escurrimiento superficial y el tránsito de avenida en una cuenca. En su ejecución requiere de especificaciones respecto al modelo de cuenca (contiene parámetros y datos conectados para elementos hidrológicos: subcuencas, tramos de tránsito, uniones y sumidero), al modelo meteorológico (curva de masa de lluvia y especificaciones), y especificaciones de control (definición de componentes y tiempo de la simulación). Para la definición de estos parámetros, se optó por dividir la cuenca en 3 subcuencas (cuenca alta Oeste -CAO-, cuenca alta Este –CAE- y cuenca baja –CB-) (Figura 2a). Se determinó la batimétrica del punto de unión de CAO y CAE para definir los parámetros del cauce según la metodología Muskignum-Cunge de 8 puntos (Figura 2b). Se eligió una curva de masa de lluvia media de 72 mm, con intervalos de registro cada 30’ y una duración total de 6 hs (Figura 2c). Se realizó la confección de la cartografía correspondiente en entorno GIS (QGIS).

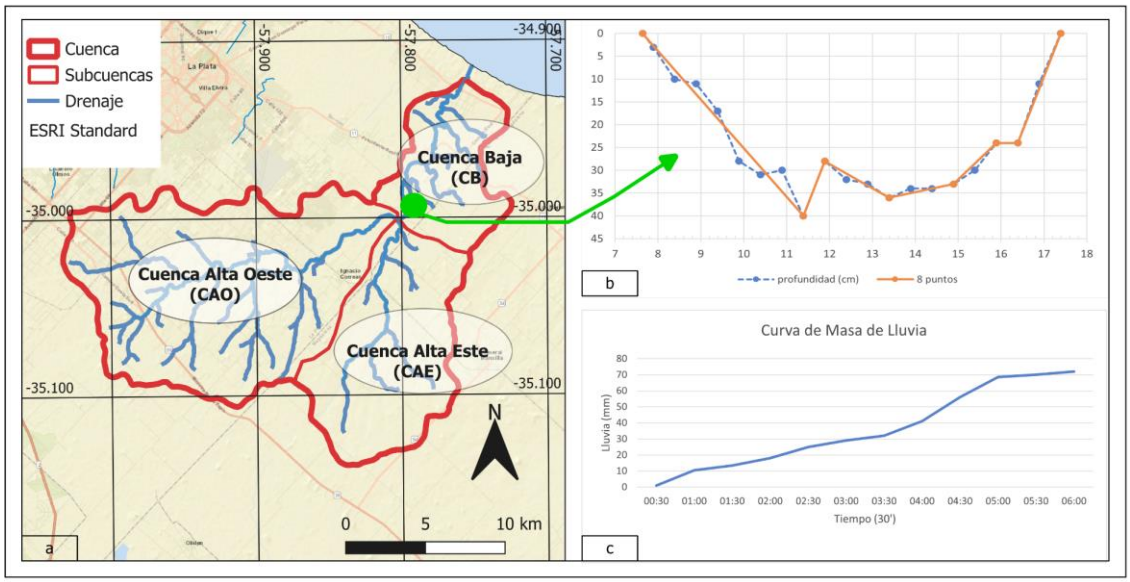


Figura 2. Definición de especificaciones para ejecución del modelado con HEC-HMS 4.11. **a**- Elementos hidrológicos (subcuencas). **b**- Perfil batimétrico adaptado a 8 puntos (Muskignum-Cunge). **c**- Curva de masa de lluvia media de 72 mm, con intervalos de registro cada 30' y una duración total de 6 hs.

Para la transformación de los valores de precipitación en escorrentía se utilizó el Hidrograma Unitario de Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y para el cálculo de las pérdidas dentro del modelo hidrológico, se utilizó el método del Número de Curva (USDA, 1972). Esta metodología depende del Grupo Hidrológico (asociado a características edáficas), del tipo de uso del suelo y cobertura vegetal presente, y de la condición de humedad antecedente. Su valor varía de 0 a 100, asociándose mayor valor a mayor escurrimiento superficial. Para su determinación se utilizaron las tablas provistas por USDA (2004). Los grupos hidrológicos de suelo fueron establecidos a partir del National Engineering Handbook Part 630 (USDA, 2007), estos grupos se dividen en cuatro categorías de acuerdo con su capacidad de infiltración decreciente: A, B, C y D. Por su parte, la caracterización de los suelos se basó en estudios realizados por el INTA y por Hurtado et al. (2006). Los usos del suelo dentro de la cuenca se establecieron a partir de imágenes satelitales provistas por Google Earth ©, siendo complementadas con puntos de control en el terreno.

La ecuación utilizada para estimar el escurrimiento superficial se basó en USDA (1986) Ec. (1):

$$Q = \frac{(P - 0{,}2 * S)^2}{P + 0.8 * S} \# \dots Ec.(1)$$

Donde: Q es el escurrimiento superficial (mm), P es la precipitación (mm) y S es la máxima retención potencial (mm), la cual se relaciona por medio de la Ec. (2) con las características edáficas y de uso del suelo, a través del ya mencionado NC.

$$S = 254\left(\frac{100}{NC} - 1\right) \# \dots Ec.(2)$$

Los datos topográficos para ingresar en el modelo (como la pendiente media de las subcuencas y las pendientes de las secciones del cauce, y los tiempos de concentración, entre otros), se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación de 30m de resolución, provisto por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Es necesario mencionar que, al momento de modelar, se consideró como nulo el flujo base.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pendientes obtenidas variaron entre 0,005 y 0,087%, con tiempos de concentración de 4 a 6,54 horas, calculados con la ecuación de la Dirección General de Carreteras de España (Besteiro y Gaspari, 2012).

En la Fig. 3 puede verse el plano de números de curva obtenidos para la cuenca, el cual fue necesario el cálculo del número de curva ponderado para cada subcuenca que pide El modelo HEC-HMS. Este mapa, es el resultado del cruce de los suelos en la cuenca, caracterizados por sus texturas franco-limoso, franco-arcillo-limoso y arcillo-limoso (correspondiéndose con los Grupos Hidrológicos B, C y D), con los principales usos del suelo identificados (cultivos, forestal, pastizal, zonas de invernáculos y áreas urbanas) (ver Fig. 4).

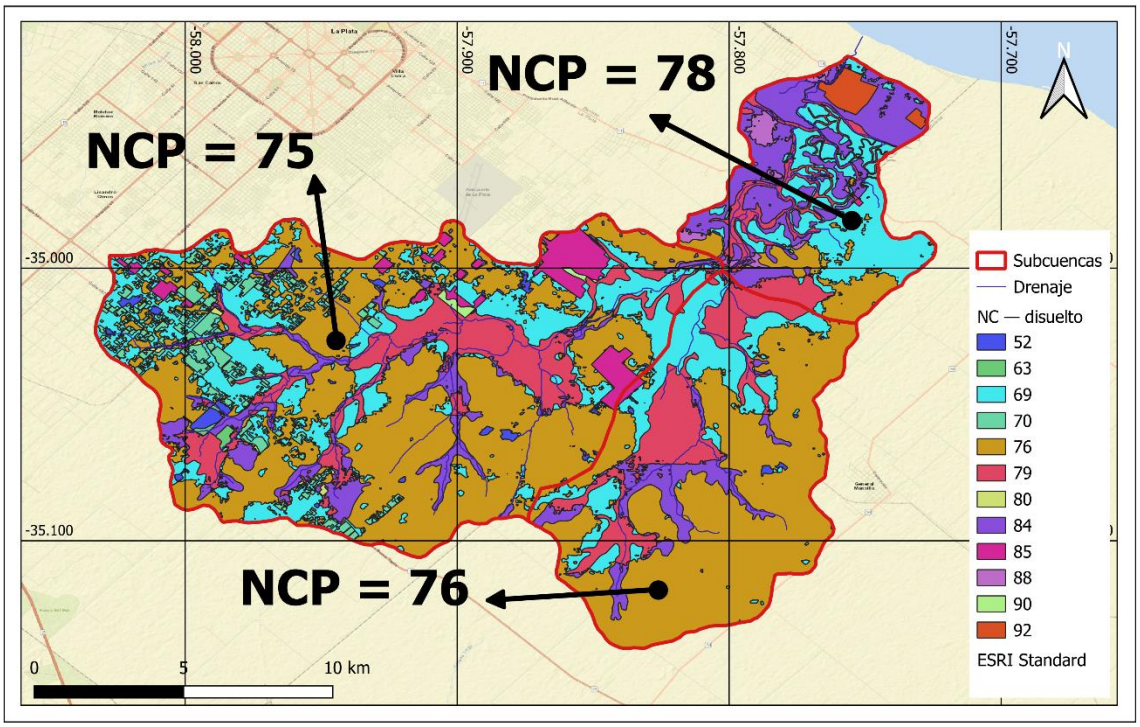


Figura 3. Números de curva ponderados (NCP) de la Cuenca del arroyo El Pescado.

 ISBN 978-987-1323-91-3

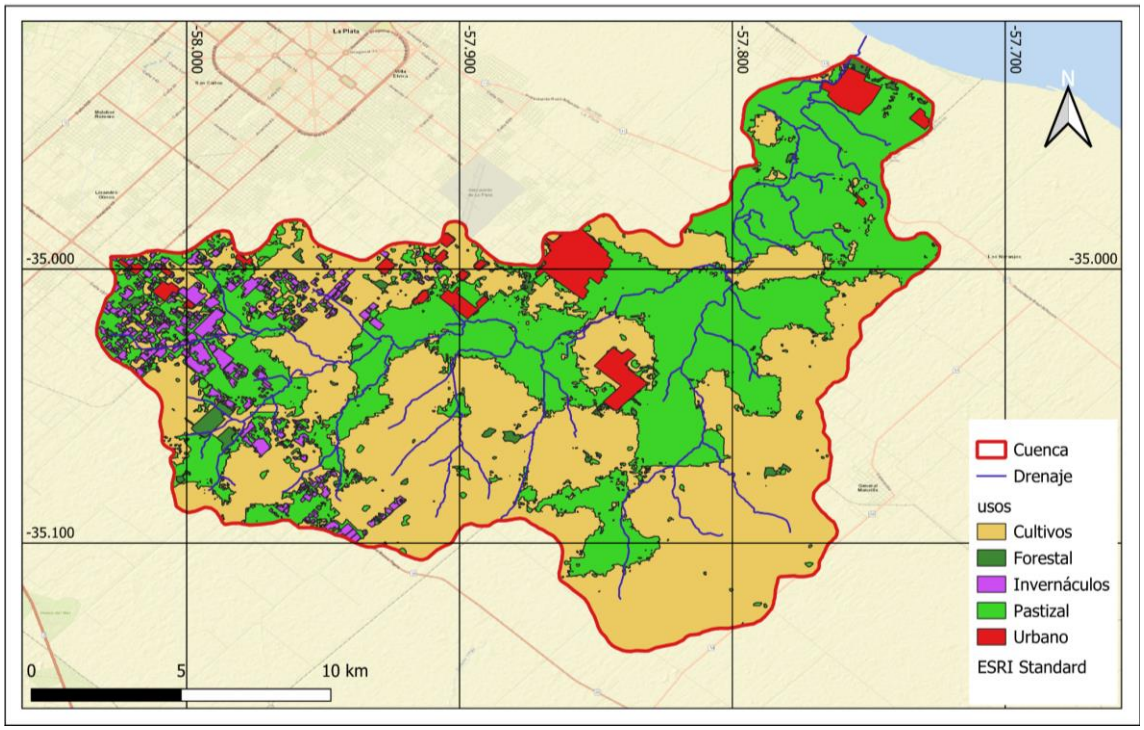


Figura 4. Usos del suelo de la Cuenca del arroyo El Pescado.

En la tabla de resumen del modelado (Tabla I), se confirma la fragilidad de estos ambientes ante un evento de lluvia promedio, en donde los caudales líquidos ascienden a valores superiores al 34% de la lluvia acumulada, a pesar de tratarse de una cuenca de llanura.

Tabla I. Comportamiento de los elementos compositivos de la cuenca ante un evento de lluvia de 72mm y 6 horas de duración.

Elemento	Área (Km²)	Descarga (m^3/s)	Volumen (mm)
Cuenca Alta Oeste	195	214,8	21,0
Cuenca Alta Este	100	155,8	22,4
Cuenca Alta Oeste + Este	295	353,0	21,5
Traslado a aforo	295	352,1	21,4
Cuenca Baja	53	62,3	24,9
Aforo	348	414,1	22,0

Los hidrogramas de avenida obtenidos (ver Fig. 5 a 8), indican caudales pico desplazados con retardos de hasta 3 horas de finalizada la lluvia, y caudales que ascienden a valores cercanos a los 200 m^3/s en el punto de aforo de la cuenca.

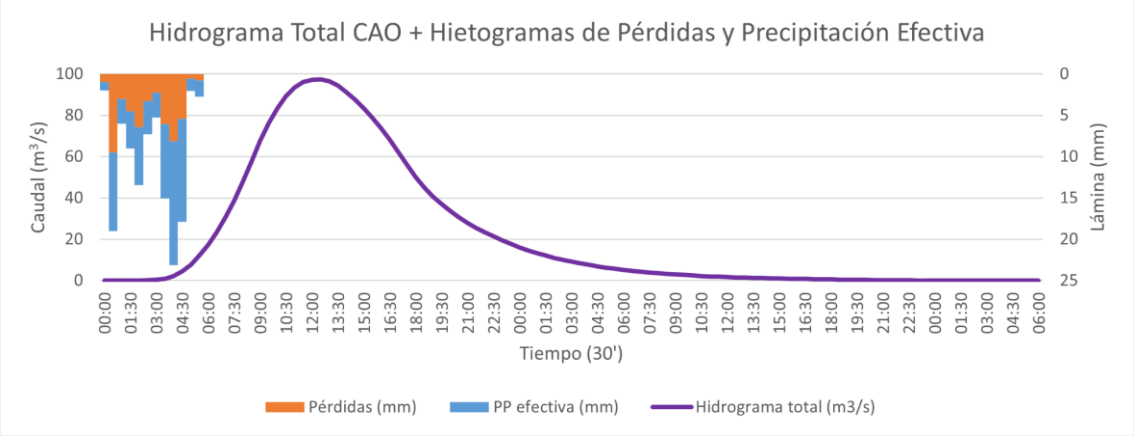


Figura 5. Hidrograma parcial de la Cuenca Alta Oeste junto a Hietograma de pérdidas y precipitación efectiva correspondiente.

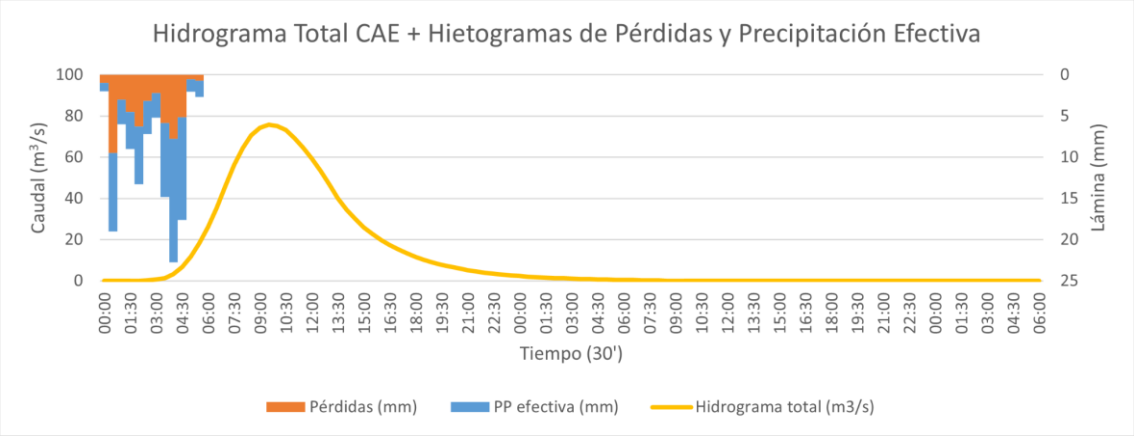


Figura 6. Hidrograma parcial de la Cuenca Alta Este junto a Hietograma de pérdidas y precipitación efectiva correspondiente.

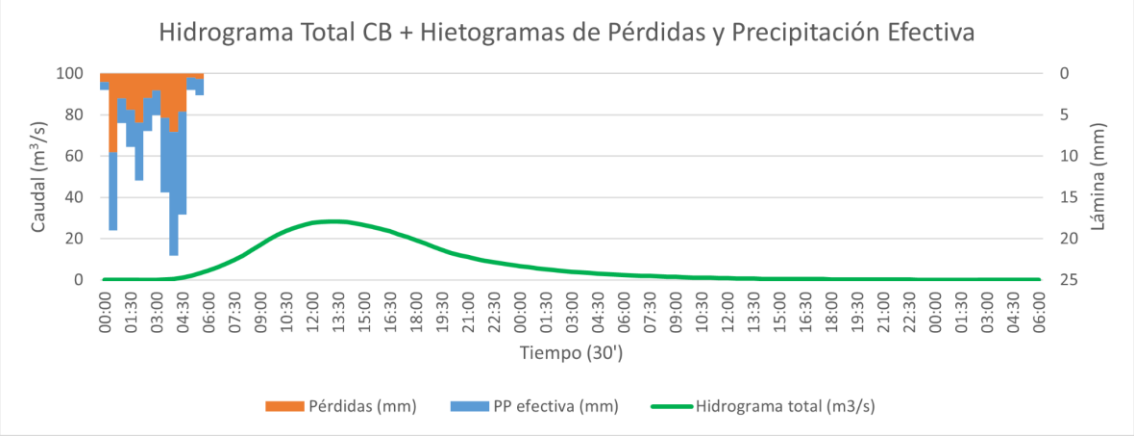


Figura 7. Hidrograma parcial de la Cuenca Baja junto a Hietograma de pérdidas y precipitación efectiva correspondiente.

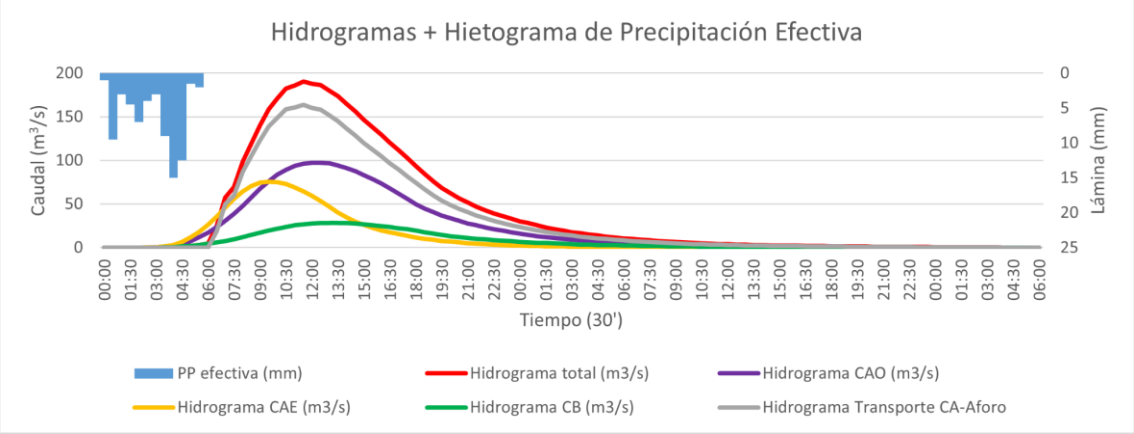


Figura 8. Visualización de los Hidrogramas parciales de las 3 subcuencas (CAO, CAE, CB), el transporte de las cuencas altas al punto de aforo y del Hidrograma Total en el punto de Aforo de la cuenca El Pescado, generados a partir del Hietograma Simulado.

Si, además, consideramos el perfil batimétrico ubicado en la unión de CAO y CAE, con picos de caudal de 170 m³/s (ver Fig. 9), puede inferirse la ocurrencia de desbordes sobre las planicies de inundación de estos cauces.

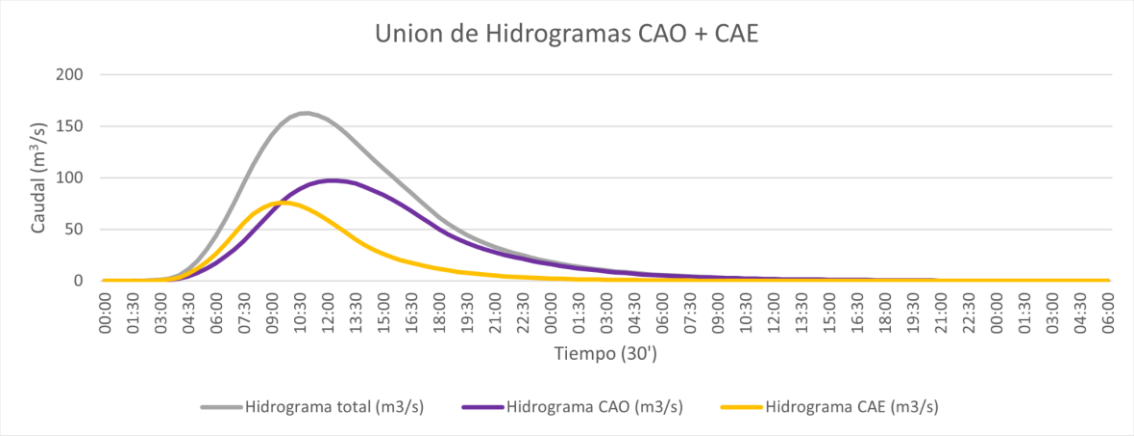


Figura 9. Hidrogramas parciales de las cuencas altas Oeste y Este (CAO + CAE), en el punto de unión donde se realizó el perfil batimétrico para el traslado al punto de aforo de la cuenca.

CONCLUSIONES

Este tipo de modelizaciones son válidos para terrenos llanos y toman relevancia cuando se carece de registros pluviográficos específicos, ya que permiten obtener los hidrogramas correspondientes a los escurrimientos en función de las características morfológicas de la cuenca, teniendo en cuenta además el tipo de suelo y el uso del suelo presente en el área. Este aspecto se torna esencial para la toma de decisiones respecto a la gestión del recurso, ya que permitirá estimar la respuesta del sistema frente a diferentes eventos climáticos y diversos escenarios en cuanto al uso del suelo. Cabe recordar que, si bien la cuenca en estudio constituye desde hace más de 25 años un territorio protegido, el proceso de transformación territorial que está atravesando hace presuponer situaciones aún más complejas hidrológicamente, en cuanto al incremento de áreas impermeables o semi-impermeables en el corto y mediano plazo.

Este trabajo constituye un primer estudio preliminar en cuanto a la modelización hidrológica de la cuenca entera del arroyo El Pescado, los pasos siguientes abordarán el ajuste del modelo con datos actuales de caudales y registros pluviográficos a fin de realizar la validación conducente a la correcta simulación de escenarios hipotéticos futuros.

REFERENCIAS

Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (2000). World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. Kluwer Academic Publishers. 10.1023/A:1006443627511

Auge, M. (2005) Hidrogeología de La Plata, provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, pp. 293-311.

Besteiro, S. I., & Gaspari, F. J. (2012). Modelization of the sediments emission in a watershed with forestations of Northeast Pampean.

Carol, E., Kruse, E., Laurencena, P., Rojo, A., & Deluchi, M. (2012) "Ionic exchange in groundwater hydrochemical evolution. Study case: the drainage basin of El Pescado creek (Buenos Aires province, Argentina)", Environmental Earth Sciences 65, pp. 421-428. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1318-z.

Cosgrove, W. J., & Rijsberman, F. R. (2000). World Water Vision: Making Water Everybody's Business. World Water Council.

Delgado, M.I, Carol E. (2018). Relación escurrimiento/infiltración en una cuenca periurbana de llanura. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Salta.

Delgado, M.I., Carol, E., Casco, M.A., Mac & Donagh, M.E. (2018) "The Peri-Urban Interface: Hydrological Effects of Anthropogenic Pressure", Pollution Research 37, pp. 91-99.

Delgado, M.I., Carol, E., Casco M.A. (2020). Land-use changes in the periurban interface: Hydrologic consequences on a flatland-watershed scale. Science of the Total Environment 722, 137836. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137836

Hurtado, M. A., Giménez, J. E. y Cabral, M. G. (2006). Análisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial. 1ª ed. Buenos Aires. Consejo Federal de Inversiones.

Hydrologic Engineering Center (HEC). (2017). HEC-HMS (versión 4.11) [Software de modelado hidrológico]. Disponible en [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx].

Kruse, E., Carol, E., Mancuso, M., Laurencena, P., Deluchi, M. & Rojo, A. (2013) Recharge assessment in an urban area: a case study of La Plata, Argentina. Hydrogeology Journal 21, pp. 1091–1100. https://doi.org/10.1007/s10040-013-0981-4.

Ley provincial 12.247. (1999) Declaración de la cuenca del arroyo Es Pescado como paisaje protegido de interés provincial. https://normas.gba.gob.ar/ar-b/ley/1999/12247/4587

U.S. Army Corps of Engineers. (2023). Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Manual de usuario [CPD-74A]. Recuperado de [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_User's_Manual-v4.11-20231018.pdf].

USDA. 1972. Section 4: Hidrology. National engineering handbook. Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.

USDA. 1986. Technical Release 55. Urban Hydrology for Small Watersheds.

USDA. 2004. National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, Chapter 9.

USDA. 2007. National Engineering Handbook Part 630 Hydrologic Soil Groups. Chapter 7.

ANALISIS DE DOS EVENTOS DE CALENTAMIENTO SUBITO ESTRATOSFERICO Y SU IMACTO AL VORTICE POLAR Y EL AGUJERO DE OZONO DEL HEMISFERIO SUR.

Carbajal Benítez Gerardo[a], Ochoa Héctor[b], Condori Lino[a] Y Estevez Pérez Héctor[c].

[a]Dirección Central de Monitoreo del Clima, Dirección Nacional, Directora Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
[b]Dirección Nacional Antártica/Instituto Antártico Argentino.
[c]Instituto de Geofísica, Red radiométrica Mexicana, UNAM, México

e-mail: gcarbajal@smn.gob.ar

RESUMEN

El calentamiento súbito estratosférico (CSE), aún no está entendido del todo, es decir no se sabe su origen, pero si su impacto y sus consecuencias. Este fenomenito atmosférico es muy común en el Hemisferio Norte (HN) y produce indirectamente grandes nevadas y olas de frio, tanto en América del Norte, Europa y Rusia, debido a que perturba el vórtice polar, generando una ondulación (Fase Negativa). Esta perturbación es debido al flujo de ondas atmosféricas que se generan por la gran cantidad de continente. Mientras que, en el Hemisferio Sur (HS) es poco común e inusual que se presenten, debido a que hay poco continente y más océanos, lo que produce muy pocas ondas atmosféricas y muy poco transporte de calor de calor desde el Ecuador. En este trabajo se presentan dos eventos más actuales de este fenómeno para los años 2019 y 2023. En ambos casos se observa una reducción de la destrucción de ozono que es más notable en el año 2019, debido a que el calentamiento fue de casi 10°K, en tanto que el año 2023 el ascenso de temperatura no supera los 5°K, es decir, la actividad de ondas fue mucho mayor en el año 2019 que en el 2023 y por lo tanto mayor flujo de calor hacia el vórtice polar en el 2019 que en el 2023. Un dato interesante es que para el año 2023, el vórtice polar del HS, se ve afectado por dos procesos dinámicos de la atmosfera; el primero, por el remanente de vapor de agua en la estratosfera debido a las emisiones del volcán Hunga Tonga en el 2022, lo que hace una estratosfera muy fría y las Nubes Estratosféricas Polares empieza su desarrollo tempranamente. Segundo, el CSE que no permite más el crecimiento del agujero de ozono.

Palabras clave: Calentamiento Súbito Estratosférico, Vórtice Polar y Agujero de Ozono.

INTRODUCCIÓN

En la comunidad científica, aun no se entiende del todo el fenómeno que sucede en la estratósfera llamado Calentamiento Súbito Estratosférico (CSE). Este evento se presenta durante los periodos invernales de ambos polos, siendo el Hemisferio Norte (HN) el de mayor impacto (Mitra, and Guaharay, 2024). Los CSE impactan al vórtice que es un cinturón de vientos que circundan los polos y lo pueden desestabilizar, debilitándolo y en ocasiones rompiendo dicho vórtice. Esta situación, produce en consecuencia, grandes y frecuentes desplazamientos de frentes fríos, de tal manera que se presentan olas de

frío e intensas nevadas, que impactan a los diversos ecosistemas vivos, como la salud humana llegando hasta la mortalidad (Tomassini et al, 2012).

Unos de los factores que generan los CSE, quizás más directos, es el movimiento de ondas atmosféricas, que se propagan desde la troposfera de latitudes medias hacia estratosfera de latitudes altas y polares, además son los responsables de transportar energía en forma de calor (Matsuno, 1971). Estas ondas atmosféricas se producen con más frecuencia y con más intensidad en el HN que en el Hemisferio Sur (HS), debido al forzante orográfico y continental, mientras que en el HS en su gran mayoría hay océano y por lo tanto se producen en mucho menor grado la propagación de ondas (Tomassini et). Esta situación, hace que se reduzca la frecuencia de los CSF en el HS, pero cuando estos eventos se presentan, pueden modular el tamaño de los agujeros de ozono, de tal manera hacen que estos sean más pequeños.

El objetivo de este trabajo es analizar dos eventos de CSE que se han producido en el año 2019 y actualmente en el 2023, con la finalidad de continuar con el entendimiento de su naturaleza de este fenómeno, además del impacto en el vórtice polar y el agujero de ozono, para esos dos años.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como primer paso, se detectan dos eventos de CSE que recientemente se presentan y que son muy representativos del efecto y el impacto en los agujeros de ozono. Uno de ellos se presenta en el año 2019, que produjo un agujero más pequeño desde los inicios del monitoreo, siendo el 38° lugar en el ranking (Mayor a menor) del periodo de 1979 a 2019, 44 años de monitoreo (Gerardo et al, 2019, and Gerardo et al, 2022, and Gerardo et al, 2023). El segundo seleccionado es el pasado 2023, que no fue tan importante, pero su impacto hizo que no se tuviera un agujero mucho mayor de lo que se esperaba. Los datos usados para este trabajo son:

1. Datos del satélite Nimbus 7, que tiene montado el Espectrómetro solar de mapeo UV y mapeo de ozono total (SBUV/TOMS). Periodo 1979 a 1994 (44 años).

2. Datos del satélite AURA que cuenta con el espectrómetro OMI y OMPS. Periodo 1979 a 2023 (44 años).

3. Modelos de asimilación (MERRA y MSR-2) Periodo 1960 a 2023 (53 años).

4. Campos de hemisferios del Center for Global Environmental Research (NCEP) para los años 2019 y 2023.

5. Campos de circulación estratosférica de Tokio Climate Center (Stratosphere Circulation).

6. Datos de observaciones de ozonosondeos de ozono y humedad relativa (HR%) de las estaciones Belgrano II y Ushuaia.

Con los datos obtenidos de los diferentes portales se procede con el análisis y comparación de la propagación de ondas en la atmosfera y el transporte de calor hacia el polo sur. Lo cual tiene una repercusión en el vórtice polar del HS, debido a que un

evento de SSW lo debilita y puede haber un calentamiento abrupto en la estratosfera, lo que permitirá inhibir la producción de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP), por tal motivo los procesos de destrucción de ozono pueden ser más lentos y esta manera el agujero de ozono será más pequeño. Se analiza los ozonosondeos del año 2023, para detectar valores altos de humedad o vapor de agua en la estratosfera Antártica y finalmente, se analiza el contexto de los dos años analizados, respecto al monitoreo histórico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PROPAGACIÓN DE ONDAS

En la Figura 1 se muestra los dos eventos de movimiento de onda atmosférico a través del flujo vertical Eliassen-Palm (E-P) (a y b) donde se interpreta que, cuando la escala cuando tiende hacia el color rojo, el movimiento de onda se intensifica, situación contraria, cuando se tiende al color azul el movimiento de onda tiende hacia la calma. Para este caso, los valores tienden hacia el rojo, indicativo de un intenso movimiento de onda, en especial en el año 2019, donde es más intenso y más prolongado, mientras que para el año 2023, es menor el movimiento.

La consecuencia de la intensificación del movimiento de ondas se observa en aumento de transporte del flujo de calor (c) que incluso, llega a romper record en el 2019 del periodo en el que se compara (1979 a 2023). Las ondas atmosféricas, son las encargadas de transportar masa y energía, desde la troposfera de latitudes medias hasta la estratosfera de latitudes altas e incluso polares. En ese sentido el gráfico de flujo de calor se interpreta que entre más negativo es mayor el flujo de calor para el HS.

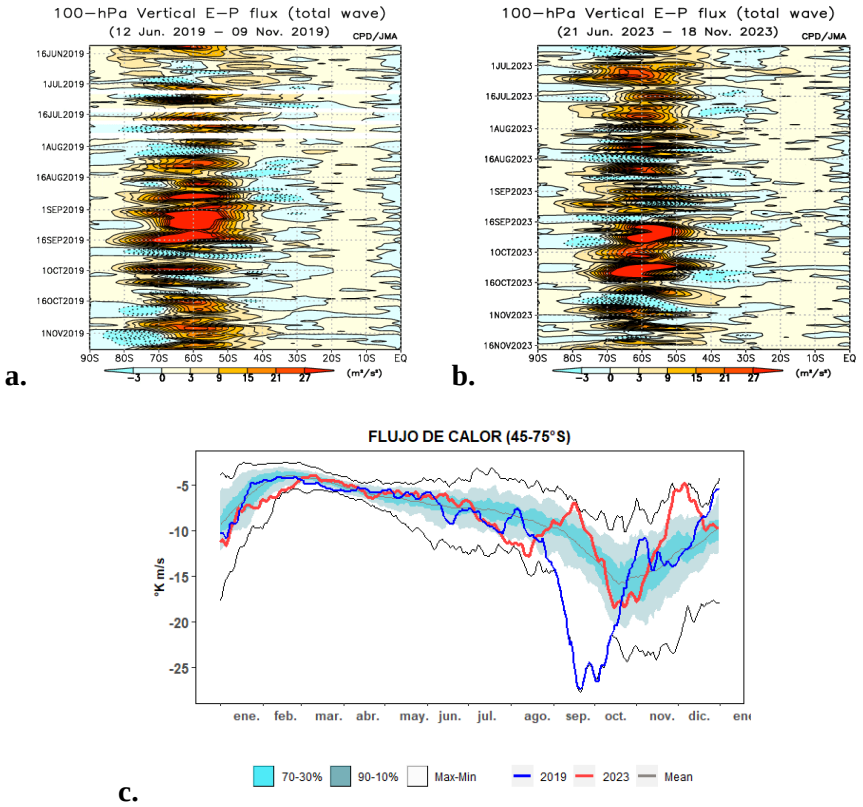


Figura 1. a. Movimiento de onda del flujo E-P para el año 2019. **b.** Movimiento de onda del flujo E-P para el año 2019. **c**. El flujo de energía en forma de calor para el Hemisferio Sur.

VÓRTICE POLAR EN EL HEMISFERIO SUR.

Tanto el vórtice polar en la estratosfera del año 2019 como el 2023, se ve impactado por el aumento de movimiento de ondas atmosféricas, el cual se desequilibra y deforma, incluso dentro del vórtice hace aumentar la temperatura. Este efecto hace que la producción de Nubes Estratosféricas Polares se vea inhibida e incluso se observa un decaimiento en el área y volumen. Consecuentemente, los procesos químicos estratosféricos de la destrucción de ozono que en ellos se llevan a cabo, son interrumpidos de tal manera que los agujeros de ozono, nos son tan grandes.

En la Figura 2, se observa una comparación del vórtice polar, a través del Potencial de Vorticidad en tres diferentes años y tres diferentes escenarios (a, b y c). Con el fin de solo comparar, se agrega a este análisis el año 2015 (a) y observamos que después de la erupción del Volcán Calbuco en Chile, el cual inyecta aerosoles en la estratosfera del HS y enfría la misma, poco movimiento de ondas atmosféricas hace que el vórtice se desarrolle sin impactos significativos y se profundice, lo que genera un vórtice muy estable y persistente.

En el año 2019 (b), se presenta el mayor calentamiento súbito estratosférico desde que se inicia con el monitoreo desde 1979 hasta 2023, el cual produce un desequilibrio y deforma el vórtice. Este efecto hace que la temperatura de la estratosfera, dentro del vórtice, esta se eleva.

Para este año 2023 (c), nuevamente se presenta un calentamiento súbito estratosférico pero no tan importante como el del año 2019, pero alcanza a desestabilizar y deformar el vórtice, permitiendo la entrada de calor a la estratosfera dentro del vórtice. El efecto del CSE, se puede observar en la serie de tiempo de las temperaturas mínimas en la estratosfera del HS (d) donde se observa claramente que en el mes de septiembre inician dichos eventos de CSE, siendo el 2019 el más notorio, inclusive alcanzan a superar los valores máximos históricos del periodo 1979 a 2023, el aumento de la temperatura llega a ser, inclusive de casi 10°K para el año 2019, en tanto que el 2023 es más pequeño el evento analizado, donde se eleva la temperatura, pero no llega a superar los 5°K.

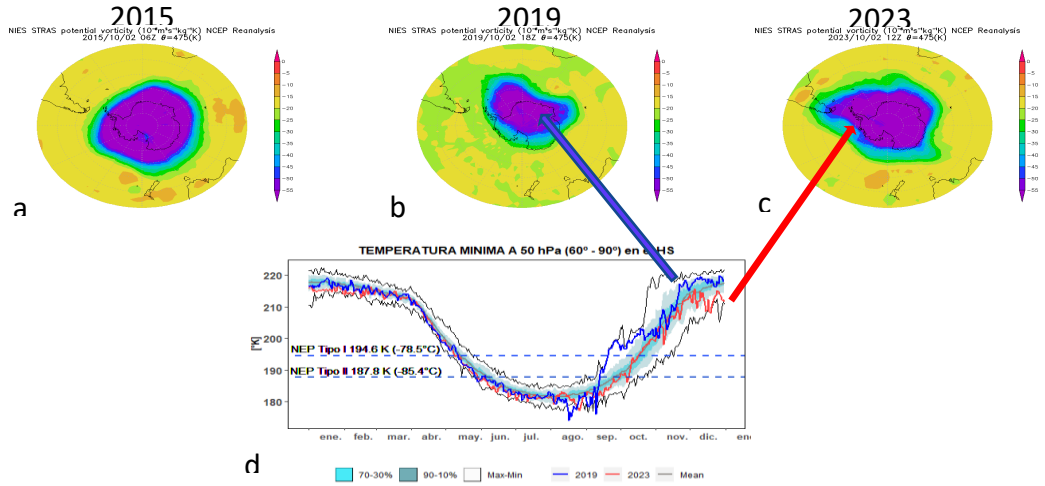
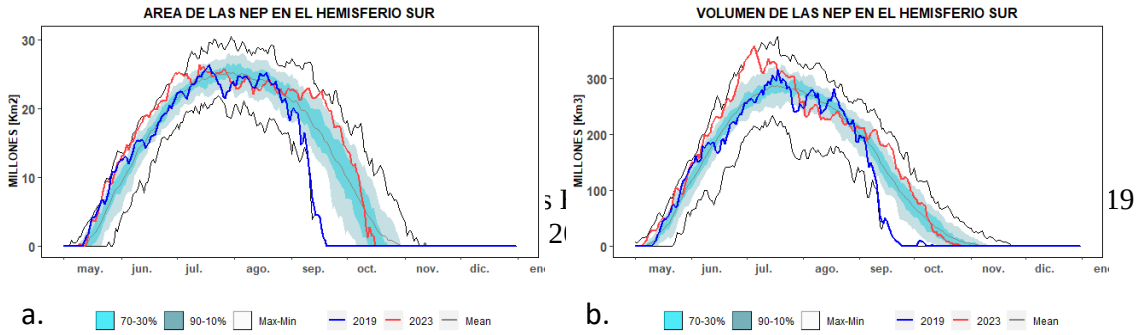


Figura 2. Comparativo del Vórtice Polar (Potencial de Vorticidad) en una superficie isotrópica de 475°K y las temperaturas mínimas en la estratosfera del Hemisferio Sur (50hPa), línea roja 2019 y línea azul 2023.

NUBES ESTRATOSFÉRICAS POLARES

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas en la estratosfera; se considera Tipo I (ácido nítrico tri-hídratado, NAT) las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) y las Tipo II por debajo de los 187,7 K (-85,3°C). Estas NEP son reservorios de las sustancias destructoras de ozono, a través de reacciones heterogenias en su superficie. Estas nubes se empiezan a formar el inicio del invierno austral y decaen a lo largo de la primavera.

En la figura 3, se observa el desarrollo, evolución y destrucción del área y volumen de las NEP, donde es notorio que cuando se presentan los calentamientos súbitos estratosféricos, éstas decaen, siendo más notorio para el año 2019, que a mediados o la última semana de septiembre, no hay más NEP, incluso muy por debajo de los registros del periodo 1979 a 2023. Mientras que, para el año 2023, las NEP inician tempranamente y se van fortaleciendo su crecimiento, respondiendo a una estratosfera fría, seguramente por aerosoles que permanecen en la estratosfera de la erupción del volcán Hunga Tonga, en el año 2022 (Janusz, and Agnieszka, 2024), además de una excepcional inyección de vapor de agua que también produce el enfriamiento en la estratosfera (Santee et al, 2024).



OZONOSONDEOS EN USHUAIA Y BELGRANO II.

Debido a que la primera parte del año 2023, como se ha mencionado, la estratosfera fría es producto de la inyección de vapor de agua, que aún permanece en la estratosfera Antártica del volcán Hunga Tonga del año 2022, se analiza los perfiles de ozono y de humedad relativa, tanto fuera del vórtice polar, pero en las cercanías (Estación GAW-Ushuaia) y dentro del vórtice polar (Estación Antártica Belgrano).

En la figura 4, se muestran 8 perfiles correspondientes a los lanzamientos de la temporada de agujero de ozono 2023 en la Estación GAW-Ushuaia. Tres de ellos se realizan cuando el agujero de ozono esta deformado y pasan por encima de la estación, en ellos se observa una reducción de ozono (línea azul) a la altura de los 25 km. Esta situación se presenta los días 18 de septiembre (c), 1 (d) y 9 (e) de octubre, Los dos perfiles iniciales del 29 de julio (a) y 23 de agosto (b), son previos al inicio de la temporada del agujero de ozono y nos sirven como referencia para observar el estado inicial de la capa de ozono sobre la Antártida. Los tres últimos días la estación se mantiene fuera de la influencia del agujero de ozono, el 18 de octubre (f), 8 de noviembre (g) y 13 de diciembre (h). Con respecto a la HR% (línea roja) no se observa en la estratosfera (arriba de 15 km), valores significativos de vapor de agua, ya que en la mayoría de los casos no supera el 10%.

Para la figura 5 se muestran 16 perfiles realizados en la Estación Antártica Belgrano II, que se encuentra dentro del Vórtice polar y normalmente está influenciado por el agujero de ozono. Lo importante de esta figura, es observar la HR%, que en los días 9 de Junio (a), 25 y 30 de agosto (b, c), se observan valores muy cercanos al 60% de Humedad relativa en la estratosfera, indicativo de valores altos de vapor de agua. Para el día 21 de septiembre (d), 1 (e) y 5 de octubre (f) empieza a ser más bajos los valores de HR, aproximadamente menor a 20%. Finalmente, después del 18 de octubre (g) los valores ya se observan dentro de lo normal, es decir poco o nada de vapor de agua en la estratosfera de la Antártida.

Esto viene a confirmar los estudios de Janusz, and Agnieszka, 2024 y Santee et al, 2024, que afirman que el enfriamiento estratosférico la primera parte del invierno austral, hay vapor de agua dentro del vórtice que ayuda a la temprana formación de las NEP para la química de destrucción o agotamiento del ozono.

En base a lo anterior, se puede afirmar que al año 2023, la dinámica de la estratosfera como el vórtice, la temperatura y la formación de NEP, se vieron influenciados por dos procesos, el primero es el remanente de vapor de agua y el segundo, el calentamiento súbito estratosférico, que no fue muy importante, pero si para la evolución del agujero de ozono.

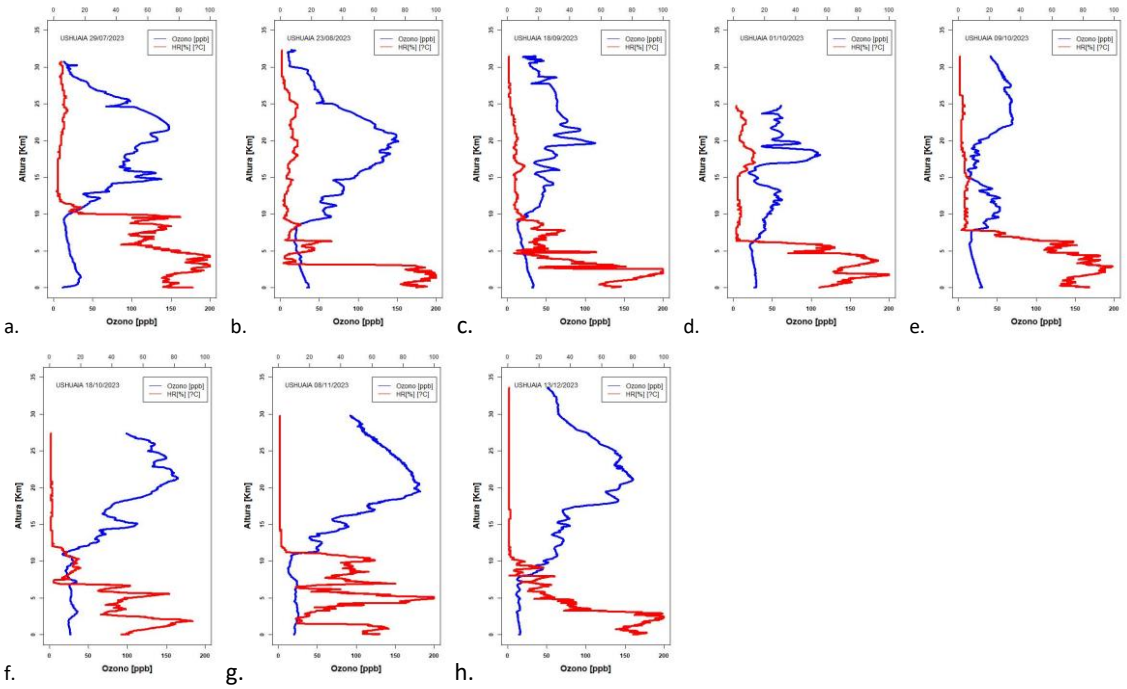


Figura 4. Perfiles de ozono y de HR% para fuera del vórtice polar, en la estación GAW-Ushuaia, 2023.

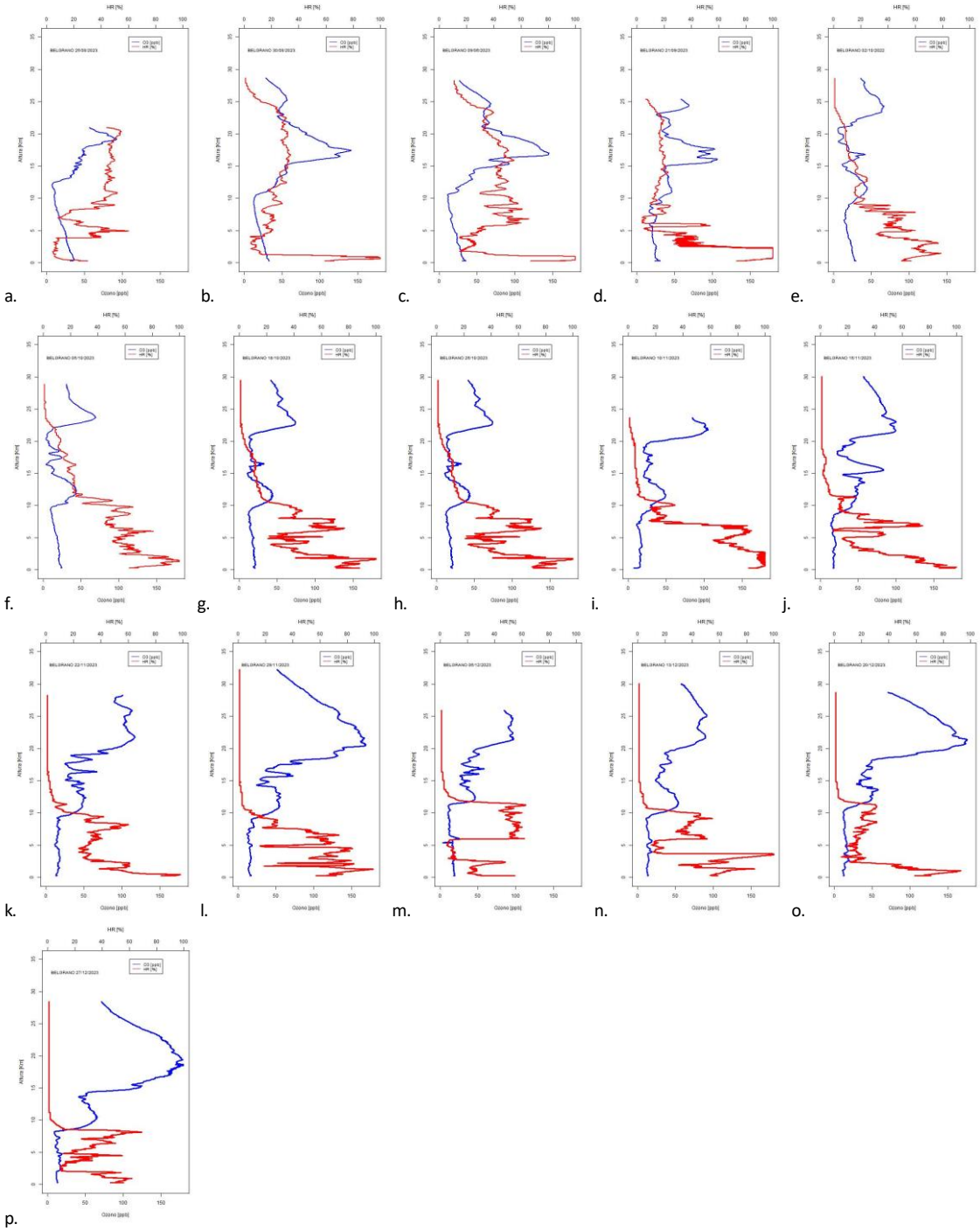


Figura 5. Perfiles de ozono y de HR% para fuera del vórtice polar, en la estación Antártica Belgrano II, 2023.

AGUJERO DE OZONO

Todo lo anteriormente analizado, tiene repercusión directa en el tamaño del agujero de ozono, una estratosfera fría, es debido a una vórtice estable y como consecuencia tenemos una formación de las NEP muy estables, da tal manera que se espera que la destrucción de ozono sea grande, es decir que el tamaño del agujero de ozono sea mayor comparado con otros, tal es el caso que se muestra en la figura 6(a y b) que para el año 2015 la formación de las NEP fue muy grande, de tal manera que el agujero de ozono de

ese año, fue uno de los más grandes desde que se inició el monitoreo del periodo 1979 al 2023. Para el año 2019 en la figura 6 (b y c) después del evento del calentamiento, produce un agujero de los más pequeños que se tienen registro. Finalmente, para el año 2023 después del calentamiento, no tan importante notamos un agujero de ozono, muy cercano al promedio.

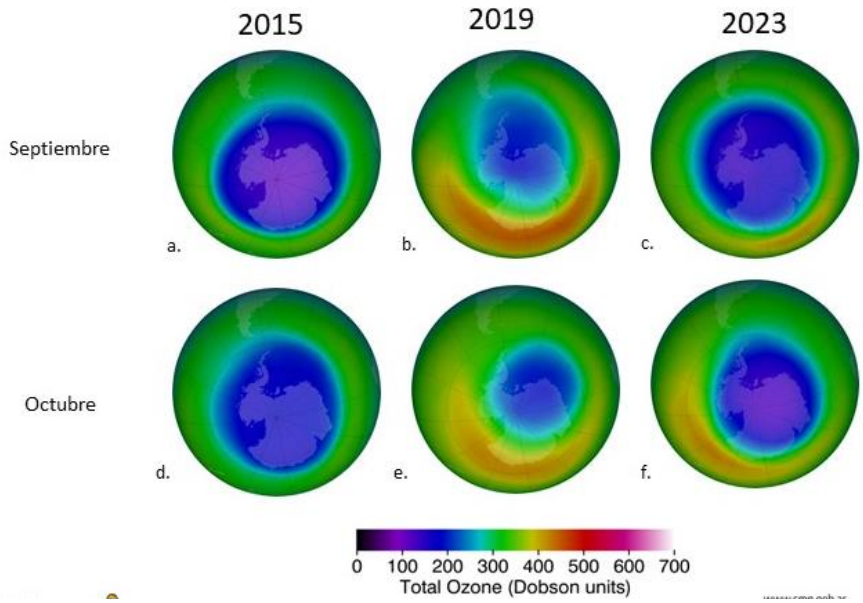


Figura 6. Comparación de los agujeros de ozono promedio mensual para los meses de septiembre y octubre, para los años 2015, 2019 y 2023.

En la figura 7, se muestra la evolución de los tamaños del agujero de ozono desde inicios del monitoreo en el año 1979 hasta el actual. En la figura 1(a) es el área máxima absoluta que se presenta en un día en específico, normalmente en el periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre de cada año. La figura 1(b) es el promedio del área del agujero de ozono, en dicho periodo.

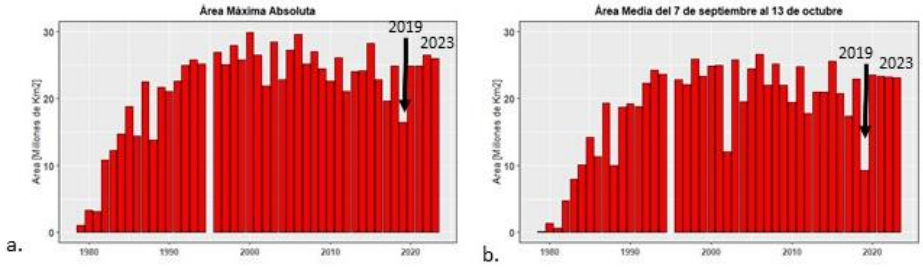


Figura 7. Comparación de los agujeros de ozono promedio mensual para los meses de septiembre y octubre, para los años 2015, 2019 y 2023.

Para el año 2019, el día 8 de septiembre, el agujero de ozono, alcanza tamaño máximo, con apenas 16,36 millones de km^2 y esto hace que en el ranking de 44 años de monitoreo, ocupe el lugar 36° de mayor a menor. Ahora, si tomamos el intervalo de

tiempo en el que se presentan los valores máximos de las áreas del agujero de ozono en toda la serie (7 de septiembre al 13 de octubre) y tomamos la media, observamos que la media para el año 2019 ha sido de 9.3 millones de km^2 por lo cual es el 38° lugar en el ranking de los 44 años, considerando de mayor a menor el tamaño del agujero de ozono. Si consideramos y comparamos con la media de toda la serie, que es de 18.9 millones de Km^2, encontramos que agujero de ozono de este año ha sido casi menor al 50% respecto a la media de los 44 años de medición.

Para el año 2023, se presenta el máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de km^2, ocupando el 13° lugar en el ranking de los 44 años de monitoreo del agujero de ozono de mayor a menor. Con respecto a la media del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre, el tamaño del agujero de ozono presenta una área media de 23,07 millones de km^2, ocupando el lugar 17° del ranking de monitoreo de los 44 años, de mayor a menor.

En la Tabla 1, se muestra el resumen de los dos años analizados y consecuencia de los calentamientos súbitos estratosféricos.

Tabla I. Tamaño de los dos agujeros de ozono.

AÑO	**Área máxima, Millones de km^2**	**Área media, Millones de km^2**
2019	16	9,3
2023	26	23,07

CONCLUSIONES

La estratosfera antártica y en particular el vórtice en el año 2023, se vio afectado por dos procelosos; el primero es una estratosfera fría, consecuencia de los remanentes de vapor de agua emitidos por el volcán Huma Tonga, 2022, que produce una temprana formación de las NEP. Posteriormente un calentamiento no tan importante, pero que repercute en el agujero de ozono, modulando su tamaño (más pequeño).

Una de las conclusiones principales de este estudio es que, los Calentamientos súbitos estratosféricos producen inestabilidad en el Vórtice Polar del Hemisferio Sur, los cuales traen consecuencias para el agujero de ozono, modulando positivamente la destrucción de ozono en la estratosfera Antártica, es decir inhiben la producción de las NEP y por lo tanto, los mecanismos de la química heterogénea de la destrucción de ozono.

La predicción de la propagación de ondas a través del flujo vertical E-P y las temperaturas en la estratosfera, puede ser un indicador de la estabilidad del vórtice y en consecuencia, del tamaño del agujero de ozono.

Se debe continuar con los estudios de los calentamientos súbitos estratosféricos para entender su génesis.

Todo lo anterior permite dar información más veraz y objetiva a medios de comunicación, público general y organismos gubernamentales, para implementar

políticas públicas de cuidado por excesos de radiación UV. Además de continuar con el monitoreo y de la capa de ozono, tan importante para la vida del planeta.

REFERENCIAS

Gerardo Carbajal Benitez, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas Informe Final –Temporada del Agujero de Ozono 2019. http://hdl.handle.net/20.500.12160/1226 (2019).

Gerardo Carbajal Benítez, Héctor R. Estévez Pérez, Héctor Ochoa, y María E. Barlasina. Dos eventos atípicos del agujero de ozono sobre la Antártida y su impacto en la radiación UV (2019 y 2020). Actas de Trabajos Completos E-ICES 16. ISBN 978-987-1323-86-9. (2022).

Gerardo Carbajal Benitez, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas Informe Final –Temporada del Agujero de Ozono 2023. http://hdl.handle.net/20.500.12160/2681 (2023).

Janusz Krzy´scin, and Agnieszka Czerwinska (2024) Signs of Slowing Recovery of Antarctic Ozone Hole in Recent Late Winter–Early Spring Seasons (2020–2023), Atmosphere 2024, 15, 80. https://doi.org/10.3390/atmos15010080.

Matsuno, T. A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming. Journal of the Atmospheric Sciences, 28(8), 1479–1494. (1971).

Mitra G, and Guaharay A. (2024) Impact of sudden stratospheric warming on middle atmospheric circulation in the southern hemisphere: A comparative study, Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics 254 (2024) 106173.

Michelle L. Santee, Gloria L Manney, Alyn Lambert, et al. (2024) The Influence of Stratospheric Hydration from the Hunga Eruption on Chemical Processing in the 2023 Antarctic Vortex. ESS. DOI: 10.22541/essoar.170542085.55151307/v1.

Tomassini, L., Gerber, E. P., Baldwin, M. P., Bunzel, F., & Giorgetta, M. The role of stratosphere-troposphere coupling in the occurrence of extreme winter cold spells over northern Europe. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 4(10). (2012).

PLANTAS FITORREMEDIADORAS DEL COMPLEJO MINERO FABRIL DE SAN RAFAEL, MENDOZA-ARGENTINA

Ana R. Castaño Gañán[a] , Rita Plá[b] , Gustavo G. Alvarez[c] , Adalgisa Scotti[c], Rodrigo Invernizzi[b], Raquel Jasan[b]

[a]*ICES – Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA*
[b]*Departamento Química Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA*

e-mail: aganan@cnea.gov.ar

RESUMEN

La vegetación presente en el Complejo Minero Fabril de San Rafael (CMFSR), tiene características especiales de adaptación, posiblemente debido a las condiciones geológicas y ambientales del lugar así como la composición elemental del sustrato, la textura, estructura y pH entre otros factores. A pesar de ser un ambiente perturbado debido a las actividades propias de mina, la vegetación nativa y exótica ha sabido permanecer y revegetalizar zonas de pasivos ambientales. Se ha logrado identificar la capacidad fitorremediadora de varias especies vegetales por medio de su Factor de Bioconcentración (FBC) y Factor de Translocación (FT). Hyalis argentea, Schinus areira, Baccharis salicifolia, y Senna aphylla, presentan capacidad para asimilar el Zn del suelo y pasarlo a su sistema radicular. T. dominguensis absorbe As. A excepción de T. dominguensis las demás especies absorben Zn activamente a partir del suelo y lo acumulan en formas no tóxicas en su biomasa aérea, lo que las hace una herramienta potencial para remediar suelos con altos valores de As y Zn respectivamente. Además se logra identificar el potencial de estas especies para la acumulación de Sr en su parte aérea.

Palabras Clave: Fitorremediación, Factor de Bioconcentración, Factor de Translocación

INTRODUCCIÓN

Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o translocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes y relativamente bajas en la biomasa aérea independientemente de la concentración metálica del suelo en un intervalo amplio (estrategia de exclusión según Baker, 1981). Sin embargo, otras absorben los metales activamente a partir del suelo y los acumulan en formas no tóxicas en su biomasa aérea (estrategia acumuladora). Una respuesta intermedia es la que presentan las plantas indicadoras, cuya concentración metálica refleja la del suelo (Baker, 1981). Entre las acumuladoras se han reconocido diferentes grados de acumulación metálica, desde pequeñas elevaciones sobre el nivel de fondo hasta concentraciones excepcionalmente elevadas de metales pesados como el Ni, Zn y Co en su biomasa aérea sin mostrar ningún síntoma visible de toxicidad (Brooks *et al*., 1977). Algunas de estas plantas, no pueden completar sus ciclos vitales cuando crecen en suelos "normales" y se denominan plantas hiperacumuladoras. El término "hiperacumuladora" fue acuñado por Brooks y Reeves para referirse a plantas desarrolladas en campo capaces de acumular >1.000 mg

Ni kg-1 de materia seca en algún tejido de su biomasa aérea (Brooks *et al*., 1977). Aunque el estándar para los hiperacumuladores no se ha introducido científicamente, algunos autores han definido una concentración de metal especial superior a un valor específico por gr de masa seca (Ali *et al*. 2013).

La hiperacumulación es un fenómeno raro, y la base evolutiva de su selección ha sido una incertidumbre desde su descubrimiento. Algunos estudios recientes sugieren que la acumulación inusual de metales confiere a estas plantas la capacidad de limitar su depredación y las infecciones microbianas causantes de enfermedades vegetales (Boyd *et al*., 1994; Pollard y Baker, 1997; Poschenrieder *et al*., 2006). Hasta la actualidad, se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras, distribuidas entre 45 familias, lo que representa sólo un 0,2% de las angiospermas (Baker *et al*., 2000; McGrath y Zhao, 2003). No obstante, la lista sigue creciendo con citas recientes tanto para las especies vegetales como para su capacidad de captación de diferentes metales pesados, elementos traza y hasta radioisótopos desde el suelo; se destacan las investigaciones en laboratorio pero han empezado a surgir estudios con vegetación nativa por ejemplo los trabajos de Sasmaz and Sasmaz, (2017); Castaño *et al*, (2021). Las hiperacumuladoras son las especies de plantas deseables para realizar fitoextracción, ya que tienen una alta capacidad para absorber y acumular contaminantes (Ali *et al*. 2013; Awa y Hadibarata 2020).

La existencia de plantas hiperacumuladoras de metales pesados es ampliamente conocida, pero la idea de cultivarlas para extraer los contaminantes del suelo (fitoextracción natural) es relativamente reciente. Esta técnica presenta todavía numerosas limitaciones que impiden realizar la descontaminación de los suelos en poco tiempo. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta el momento ya han dado resultados prometedores. Destacan los estudios dirigidos a obtener un aumento de la productividad de estas especies y de su capacidad de acumulación metálica, a través de la selección y reproducción de cultivares mejorados y de la optimización de las prácticas de manejo del suelo. Paralelamente, los avances realizados en el entendimiento de las relaciones suelo-planta-microorganismos permitirán, en un futuro próximo, modificar las condiciones en la rizosfera de las plantas hiperacumuladoras para potenciar la absorción y la translocación de los metales. Entender la vegetación como un limitador de la dispersión de los metales pesados, además los beneficios no tangibles que esta ofrece, y tener claro de que en las áreas donde hubo minería a cielo abierto, donde el metal pesado hace parte de la geología del lugar, sólo se debe hablar de remediación del pasivo ambiental generado, la actividad antrópica los ha hecho más disponibles ambientalmente con la susceptibilidad de contaminación ambiental.

Sin embargo, la fitoestabilización es sólo una estrategia de manejo para inactivar y estabilizar los metales pesados, ya que no elimina el contaminante del medio ambiente (Awa y Hadibarata 2020; Sasmaz y Sasmaz 2009).

El arsénico ocurre naturalmente en el suelo y en minerales y por lo tanto puede entrar al aire, al agua y al suelo en polvo que levanta el viento. También puede entrar al agua en agua de escorrentía o en agua que se filtra a través del suelo. Las erupciones volcánicas constituyen otra fuente de arsénico. El arsénico está asociado con minerales que se minan para extraer metales, como por ejemplo cobre y plomo, y puede entrar al ambiente cuando se extraen o funden estos minerales. También se pueden liberar a la

atmósfera cantidades pequeñas de arsénico desde plantas de carbón y desde incineradores porque a menudo el carbón y los productos de desecho contienen arsénico.

El Cr es un metal de transición y el primer elemento del grupo VI de la tabla periódica (Jobby *et al*., 2018). Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, mayormente en forma de mineral de cromita (FeCr2O4). La concentración de Cr en el suelo y el agua es procedente de procesos naturales y actividades antropogénicas, tales como la extracción de minerales metálicos, el curtido de pieles, la manufactura de acero inoxidable, la producción de colorantes textiles y mordientes, el galvanizado, las descargas de residuos industriales, los vertederos municipales, la quema de combustible, la irrigación de aguas residuales, los plaguicidas, los herbicidas, los antibióticos, el uso de fertilizantes, la industria papelera, entre otros (Xia *et al*., 2019).

El cesio es un metal alcalino muy blando y dúctil con un punto de fusión a 28,4º C. Es el más reactivo y menos electronegativo de todos los elementos, reacciona de forma violenta con el agua (e incluso con el hielo) además de con el oxígeno, con el que forma una mezcla de óxidos. No es muy abundante en la corteza terrestre ya que se encuentra en cantidades del orden de las 7 ppm, ocupando el lugar 46º en cuanto a abundancia de un elemento en la corteza terrestre. Al igual que el litio y el rubidio, el cesio se encuentra como un constituyente de minerales complejos. Su isótopo más estable es el Cs113 aunque el más utilizado y más conocido es el Cs127, que se aplica en la agricultura, en la industria, en la construcción, en la radioterapia contra el cáncer, en la esterilización de alimentos, en los alcantarillados y en equipamiento médico. A causa de su alta reactividad, el cesio es considerado un material peligroso y debe ser almacenado y transportado de forma totalmente aislada. El mercado del cesio es algo escaso, su producción anual en los EEUU ronda las 25 toneladas anuales y la producción mundial no la supera en muchas más (Butterman *et al*; 2005)

El estroncio es un metal alcalinotérreo del grupo II. El estroncio elemental (número atómico 38) es un metal blando de color gris plateado que se comporta de manera similar a los otros metales alcalinotérreos del grupo II. El estroncio natural es abundante en la corteza terrestre y ocupa el puesto 15 con 340 ppm, muy cerca del bario. En cuanto a la toxicidad química, el estroncio reemplaza al calcio debido a su similitud química y causa falta de calcio en los organismos. En un estudio inicial, Brooks (1972) evaluó el nivel de toxicidad del estroncio para las plantas en 30 ppm. Desde entonces, se probó la toxicidad del estroncio estable en varias plantas modelo en hidroponía y cultivo en suelo, y se observaron varios efectos. El estroncio es relativamente móvil en el agua. Sin embargo, la formación de complejos insolubles o la sorción del estroncio al suelo pueden reducir su movilidad en el agua (https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp159-c6.pdf).

El Zn, cuentan con una función biológica y poseen un cometido metabólico como cofactores de enzimas, son críticos para el crecimiento y desarrollo celular, así como también satisfacen requerimientos estructurales y fisiológicos en los organismos vivos (Broadley *et al*., 2007). Los metales pesados que no poseen una función biológica conocida son denominados no esenciales o elementos xenobióticos (Ali y Khan, 2018).

El propósito de este estudio fue identificar la capacidad fitorremediadora de *Hyalis argentea, Typha dominguensis, Schinus areira, Baccharis salicifolia, y Senna aphylla*, por medio de su Factor de Bioconcentración (FBC) y Factor de Translocación (FT), para As, Cr, Cs, Sr y Zn; en una zona en la cual se desarrolló minería a cielo abierto y de manera natural estas especies pueden estar cumpliendo una función que amerita ser puesta en valor, cómo es la fitorremediación.

METODOLOGÍA

A continuación, se describe el área de estudio y la metodología de muestreo, así como los diferentes análisis realizados a las muestras de suelo, raíz y parte aérea de cada especie vegetal.

Área de Estudio

El Yacimiento Uranífero de Sierra Pintada, ubicado a 12 km al Sur Oeste de la Villa 25 de Mayo, 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 obligado a detener sus actividades debido a razones de índole económica por la baja del precio internacional del *comodity*.

El CMFSR, comprende 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. La constitución e historia geológica del Bloque de San Rafael es compleja. 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 (Mancilla y Dieguez, 2013). Los grandes volúmenes de ignimbritas intermedias y ácidas, debido al vulcanismo permotriásico generaron las condiciones favorables para la concentración del yacimiento de uranio en el CMFSR (Kleiman, 1993).

Metodología de Muestreo.

Se muestreo vegetación y suelo de nueve parcelas correspondientes a seis sitios. En cada parcela se tomó una muestra de suelo, la cual consistió en una mezcla de cuatro a cinco porciones de suelo (submuestras) tomadas al azar en cada una de las 9 parcelas circulares (P), muestreadas de los seis sitios (S), las parcelas fueron de 100 m^2. S1P2, es una muestra tomada a orillas del **arroyo El Tigre** antes de pasar la zona minero-industrial; S2P1 está a orillas del **arroyo El Tigre** cercano a la **zona minero-industrial**; S3P1 y S3P2 se encuentran cercano al arroyo **El Tigre** pasando la **zona minero industrial** y los sitios de pasivos ambientales S4P1 y S5P1 están ubicados en la **zona minero- industrial**; S5P2 está cerca de S5P1, en la zona industrial pero sin contacto directo con los pasivos; S6P1 y

 ISBN 978-987-1323-91-3

S6P2 se encuentran **al Este de la zona industrial**, un área alejada de las actividades directas del complejo minero (Figura 1).

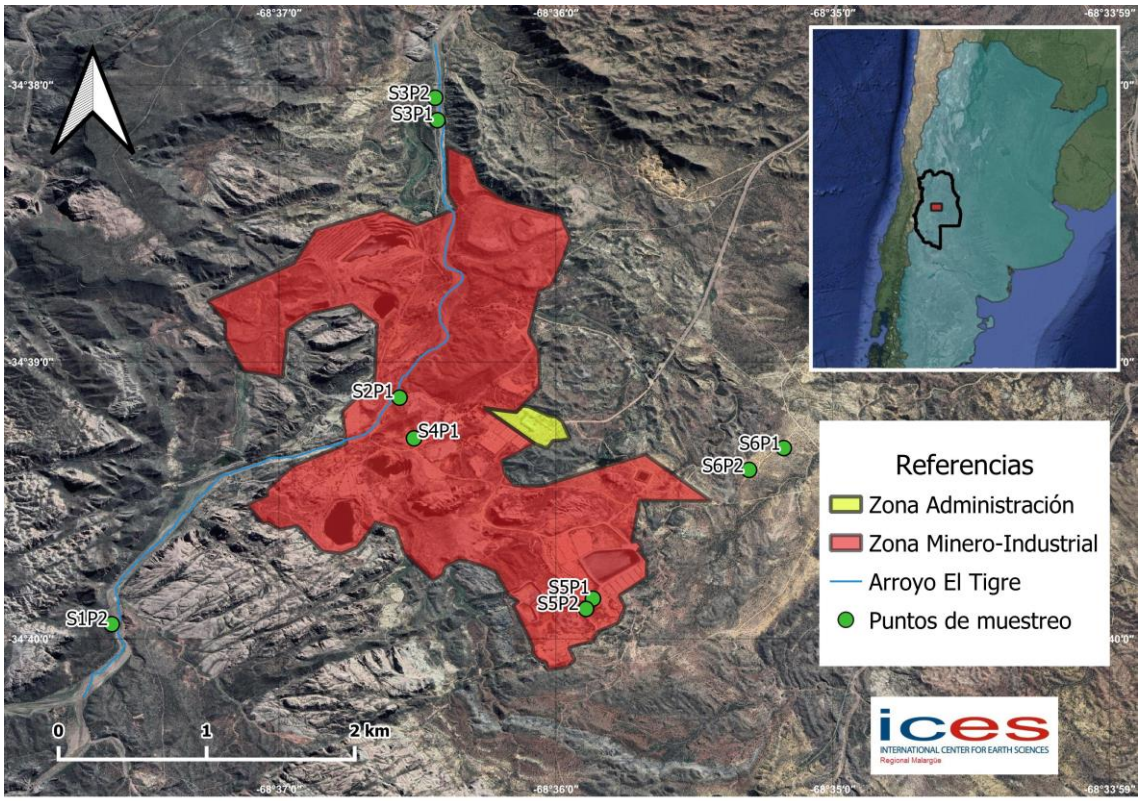


Figura 1. Área de estudio donde se logra apreciar los puntos de muestreo y cercanía o no a las zonas donde hubo actividad minera.

Las herramientas para cada toma de muestra estaban siempre limpias, libres de superficies oxidadas y sin residuos de otros materiales. En cada sitio de muestreo se removían las plantas y hojarasca fresca de un área de 40 cm x 40 cm, luego con la pala se tomaban aproximadamente 1 kg de suelo y se depositaba en un balde plástico limpio. Se removían las piedras, raíces gruesas, lombrices e insectos del suelo. Las porciones del suelo se desmenuzaban con la mano. Al final las cuatro o cinco submuestras se mezclaron en un balde para luego conformar una sola muestra de 1 kg la cual fue secada al aire hasta peso constante, en el Laboratorio de Suelos del Programa de Remediación Ambiental de la Minería del Uranio (PRAMU), donde posteriormente cada muestra se molió con un rodillo de cocina sobre papel kraft, y se seleccionó una submuestra de 50 gr para la determinación del pH y otra porción de 50 gr de suelo fue rotulada y puesta en bolsa de cierre hermético para enviar al Laboratorio Técnicas Analíticas Nucleares (TAN), Departamento Química Nuclear del CAE de CNEA, para la determinación de contenido de metales pesados, el suelo de estos sitios también ha sido analizado por medio de FRX lo que ha servido, entre otras cosas, para asignar los valores de concentración de Zn o Sr en el suelo donde con AAN, no fue posible su lectura por solapamiento entre lecturas de metales pesados.

Las especies vegetales cosechadas no siempre fueron comunes en todas las parcelas; se cosechó la parte aérea y la raíz de las especies. *H. argentea* estuvo presente en S1P2, S2P1, S4P1 y S6P2; en S3P2 se colectó *T. dominguensis; S. areira* estuvo presente en

S2P1, S3P1, S4P1 y S5P1; *B. salicifolia* hizo presencia en S1P2, S2P1, S3P1 y S4P1; *S. aphylla* estuvo presente en 6 de las 9 parcelas muestreadas S1P2, S2P1, S4P1, S5P1, S5P2 y S6P1.

El material vegetal de raíces y parte aérea se cosechó desenterrando las raíces y tomando parte aérea de cada planta en cada una de las parcelas. Este material fue puesto en bolsas de cierre hermético, debidamente rotulado. En el laboratorio del PRAMU en Malargüe, este material se acondicionó para luego ser enviado al laboratorio TAN. El acondicionamiento de las muestras consistió en lavado con agua destilada para eliminar restos de suelo y suciedad de cada una de las partes, luego secado hasta peso constante y molienda de la raíz y la parte aérea para enviar al laboratorio TAN un total de 50 gr de muestra.

Determinación de las Variables

El contenido de M.O (%), el pH y el de metales pesados de los suelos en las nueve parcelas del CFMSR, fueron determinados como se describe a continuación:

Se determinó el contenido de materia orgánica (MO) por medio del método Walkley Black (Walkley & Black (1934)). La determinación del pH en el suelo, se obtuvo luego de que este fuera tamizado para sacarle pequeñas piedras y detritos, fue molido manualmente con un palote sobre papel kraf y en un vaso graduado de laboratorio se mezcló 50 g de suelo en 150 ml de agua destilada, la solución fue agitada durante 3 minutos y se dejó reposar por otros 3 minutos antes de realizar la medición con pHmetro/conductímetro/termómetro Digital Pocket Hanna Combo.

Para la determinación de las concentraciones multielementales, las muestras fueron previamente secadas en estufa a 103 ºC por 24 horas. Posteriormente fueron envasadas en ampollas de cuarzo para su irradiación junto con los materiales de referencia certificados NIST SRM 1633b Coal Fly Ash, y Suelo Chino GBW 07405. Las muestras junto con los materiales de referencia, fueron irradiadas durante 4.5 horas en el reactor RA-3 perteneciente al CAE, CNEA. Una vez irradiadas, las muestras se recibieron en el laboratorio TAN, envasándose en recipientes nuevos para su posterior medición. Se realizaron dos mediciones con tiempos de decaimiento de 7 y 30 días aproximadamente para la determinación de: As, Cr, Cs, Sr, algunos valores de Zn se obtuvieron por medio de Fluorescencia de Rayos X. Se utilizaron detectores de GeHP Ortec (30% de eficiencia, 1.9 keV de resolución para el pico de 1332.5 keV de 60Co), un módulo buffer multicanal Ortec 919E y el software de adquisición de datos Gamma Visión. El cálculo de concentraciones se realizó a través de programas desarrollados en el laboratorio TAN.

El contenido de metales pesados en la raíz y parte aérea de la vegetación, se determinó de igual manera que al suelo, diferenciándose en que las muestras vegetales fueron, previo al análisis, molidas utilizando un molino criogénico y liofilizadas durante 24 horas. Luego fueron pastilladas y envasadas para irradiación y posterior medición. Se realizaron dos mediciones con tiempos de decaimiento de 7 y 30 días aproximadamente para la determinación de: As, Cr, Cs, Sr y Zn.

La técnica de Análisis por Activación Neutrónica (AAN) se utiliza para determinar la concentración de varios elementos en una muestra. En este caso arsénico, cromo, cesio y estroncio, se determinaron sin distinguir entre diferentes estados de oxidación, por lo que se detectó y cuantificó todo el elemento presente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de As, Cr, Cs, Sr y Zn, y valores de pH y M.O en los sitios de

MP (*ug/g*)	**S1P2**	**S2P1**	**S3P1**	**S3P2**	**S4P1**	**S5P1**	**S5P2**	**S6P1**	**S6P2**
As	7,90	8,18	7,56	6,50	21,26	25,8	13,4	7,6	21,7
Cr	52,9	50,9	45,9	37,6	18,0	30,6	28,7	19,1	41,2
Cs	5,17	6,76	10,49	12,22	11,76	18,23	16,28	10,54	21,13
Sr	517	615	341	179	431	566	38	518	490
Zn	53,5	44,9	39,3	40,9	2	4	10,2	0,3	54,8
pH	9,05	8,83	9,03	8,72	7,84	7,85	7,71	7,79	8,91
M.O %	0,4	0,4	0,9	0,5	0,3	1,5	1,1	0,8	0,6

Tabla 1. Concentración en *u*g/g de As, Cr, Cs, Sr y Zn así como sus valores de pH y porcentaje de materia orgánica en el suelo de los seis sitios muestreados del CMFSR.
muestreo

Los resultados de MO (%) y pH se muestran en la Tabla 1; así como la presencia de As, Cr, Cs, Sr, y Zn resultados de los AAN y FRX para el suelo. Diferentes concentraciones de los metales fueron detectadas en los suelos de la zona minera. Observándose las mayores concentraciones totales en S5P1 (741,92 *u*g/g) y en S2P1 (735 *u*g/g) y las concentraciones menores en S5P2 (115,15 *u*g/g) y S3P2 (285,87).

Los valores de pH en los sitios S4P1 y S5P1, son valores alterados con cal adicionada para neutralizar su acides o alcalinizarlos un poco debido a la actividad industrial desarrollada en el sitio; los demás valores de pH son naturales, propios de zonas semidesérticas del piedemonte mendocino. Los pH más altos están en S1P2 y S3P1 categorizados como fuertemente alcalino, son sitios fuera de la zona minero industrial; el valor más bajo se registró en S5P2 7,71 considerado como levemente alcalino, lugar que colinda con S5P1 que es sitio donde hubo actividad directa minero industrial.

Los porcentajes de M.O. son de manera relativa bajos, están entre 0.3 y 1,5; paradójicamente corresponde a los sitios de mayor impacto antrópico S4P1 y S5P1 respectivamente, esto valores reflejan el aporte de MO al sitio debido a la vegetación, S4P1 es un sitio plano con poca roca con vegetación pionera caracterizada por más herbáceas que arbustos, en cambio S5P1 es un sitio de topografía irregular y presenta un sustrato rocoso colonizado por vegetación pionera, en su mayoría arbustos de buen porte por lo tanto el aporte y acumulación de MO es mayo lo que permite que este sitio presente los mayores valores de MO; en las figuras 2 y 3 se observa la correlación negativa entre la M.O. y el pH que es una condición propia de las variables del suelo, lo que hace posible los desarrollos microbiológicos.

Los valores máximos para suelo de uso agrícola de As, Cr y Zn, manifestados en el decreto 831/93 de Residuos Peligrosos para Argentina son adoptadas de la normativa canadiense, siendo para estos de manera respectiva 20, 750 y 600 ppm (Environment Canadá, 1991). Y los valores máximos de Sr y Cs permitidos para suelo según la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, 2004), son de 420 y 7 ppm respectivamente.

El As está presente en el suelo en un rango entre 6,50 ppm en S3P2 y 25,8 ppm en S5P1, es As de presencia natural (Tabla 1). Son valores entre los límites permisibles de As para suelo agrícolas donde se específica que este debe ser menor a 20 ppm. En las Figura 2 y 3, se puede apreciar la correlación positiva de la presencia de As con la presencia de Cs, en menor medida con los valores de M.O, Zn y Sr; se nota su correlación negativa con Cr y los valores de pH.

La presencia de Cr no supera el valor de 750 ppm en ninguno de los sitios, el valor máximos de Cr esta en S1P2 de 52,9 ppm sitio ubicado fuera del área minero industrial, mientras el valor màs bajo se haya en S4P1 que es un sitio impactado de manear directa por la actividad minera realizada allí hace más de 25 años.

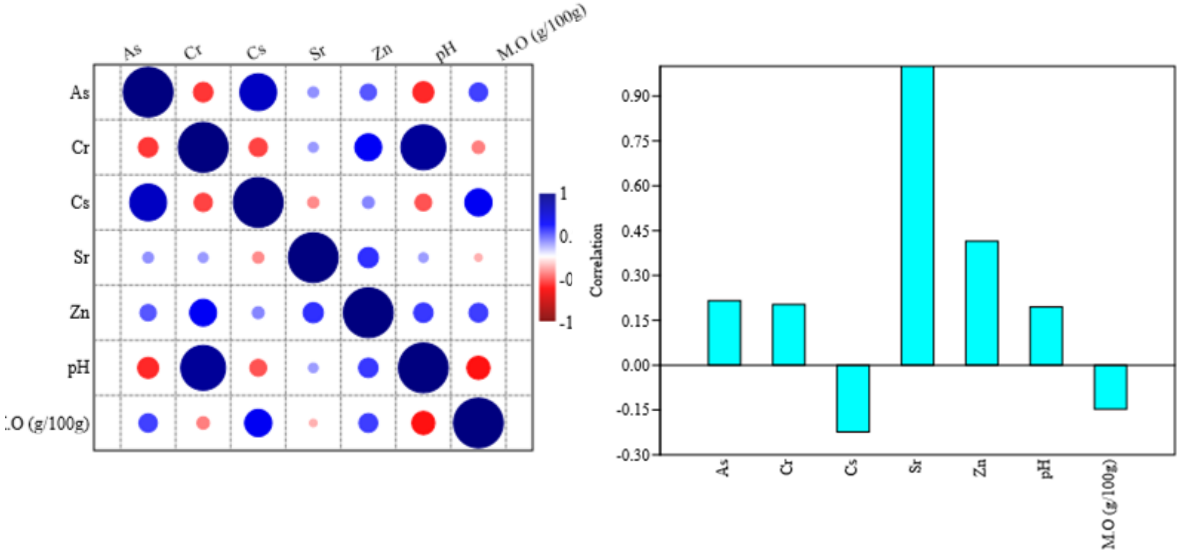


Figura 2. Correlación de Pearson para las variables determinadas en el suelo, As, Cr, Ce, Sr, Zn, pH y M.O (g/100g).

Para la normativa vigente, lo valores de Cs en el área de estudio fueron superiores específicamente en S3P1, S3P2, S4P1, S5P1, S5P2, S6P1 y S6P2 como se puede apreciar en la Tabla 1, los valores de Cs en S1P2 y S2P1 fueron de 5,17 y 6,76 respectivamente. Presenta correlación positiva con As, Zn y la MO, su correlación negativa es con el Cr, el Sr y el pH.

El estroncio se encuentra en forma natural en el suelo en cantidades muy variables, aunque la concentración típica es de 0.2 miligramos por kilogramo (kg) de suelo (0.2 mg/kg).El estroncio es un metal muy común en la corteza terrestre (Kabata-Pendias, 2001; Sparks, 2003) debido tanto a la degradación de los minerales naturales que contienen estroncio (esquistos o granitos), sedimentos carbonatados (calizas o margas) (KabataPendias, 2001, West, 2001; Moyen, 2010) o como a actividades antrópicas

 ISBN 978-987-1323-91-3

contaminantes (Moyen, 2010). En nuestros resultados el Sr sobrepasa la normativa en S1P2, S2P1, S4P, S5P1S6P1 y S6P2; los valores menores de Sr están en S3P1, S3P2 y S5P2 siendo estos de 341, 179 y 38 ppm respectivamente. Se parecía en las figuras 2 y 3 la correlación positiva del Sr con As, Cr, Zn y el pH y negativa con el Cs y la MO.
Varios estudios confirma un alto potencial de fitoextracción de estroncio en el pasto (o el heno) de los prados naturales (Korobova *et al*., 1998; OIEA, 2012). Otros estudios sugieren un alto potencial de fitoextracción de estroncio en varias familias como Fabaceae, Brassicaceae, Amaranthaceae, Plantaginaceae, Poaceae, Cucurbitacee y Asteraceae; en nuestro estudio, de las 5 familias analizadas dos de nuestras especies pertenecen a la familia Aateraceae que son *H. argentea* y *B. salicifolia*; *S. aphylla* pertenece a la familia Fabaceae, las otras dos especies *S. areira* y *T dominguensis* de la familia Anacardiaceae y Typhaceae respectivamente se destaca *T dominguensis* como especie remediadora de Cr, Mn, Ni, Pb, Se, V y Zn (Olguín *et al*. (2007), Casado-Izquierdo *et al*. (2008) y Mendoza- -Carranza *et al*. (2016)); existen reportes para un *Schinus* diferente al acá analizado; *Schinus molle* L, en fitorremediación, en especial en fitoestabilización de suelos contaminados con Cd, Cu, Mn, Pb, Zn (Mohanty *et al*., 2006).

El Zn presente en el área de estudio es realmente bajo si lo comparamos con el valor máximo de la normativa; en S5P1 se detectó el mayor valor en suelo, 92 ppm y el valor mínimo estuvo en S4P1 con 2 ppm. Se identifica en el Zn una correlación positiva con todas las variables.

Factor de Bioconcentración de Ar, Cr, Cs, Sr y Zn en *Hyalis argentea, Typha dominguensis, Schinus areira, Bacharis salicifolia* y *Senna aphylla.*

La figura 4 muestra los valores del FBC para cada especie y cada sitio, la figura presenta un eje secundario que corresponde al Zn, que es el valor de FBC que superó a la unidad. Estos valores representan la asimilación que ha podido tener la planta al captar estos elementos desde el suelo; los valores mayores a la unidad, son el elemento extraído por la plantadesde el suelo empobreciéndolo en ese elemento

H. argentea en los cuatro sitios donde está presente, mostró capacidad de acumulación de Zn en S4P1, donde logró acumular 6.3 veces más de lo que hay en el suelo, del mismo sitio para Cr y Sr el FBC fue de 01. En S1P2 el FBC para Sr y Zn fue de 0.1 y 0.4 respectivamente. En S2P1 el FBC para Sr y Zn fue de 0.1 y 0.2. En S6P2 los valores de FBC para Sr y Zn fueron de 0.3 y 0.2 respectivamente.

Typha dominguensis, estuvo presente en sólo uno de los sitios, en S3P2 con FBC>1 para As de 1.7, los demàs valores fueron de 0.4, 0.7 y 0.7 Cr, Sr y Zn respectivamente.

Schinus areira, estuvo presente en cuatro sitios, donde el FBC>1 fue para el Zn con un valor de 7.3 y de 3.5 en S4P1 y S5P1 respectivamente. Los demás elementos As, Cr, Cs y Sr presentaron FBC<1 en todos los sitios, en S3P1 el valor de FBC para Sr fue de 0.5 relativamente alto aunque no llega a la unidad.

Baccharis salicifolia, estuvo presente en S1P2, S2P1, S3P1 y S4P1, en S4P1 estuvo el FBC>1 para Zn de 11,9, lo demás FBC<1 son para Cr, Cs y Sr. En S1P2 el FBC para Sr

fue de 0.1 y el Zn de 0.2, en S2P1 los FBC para Sr y Zn fueron de 0.2 y 0.4 respectivamente; en S3P1 los valores de Cs, Sr y Zn fueron de 0.1, 0.2 y 0.3 respectivamente.

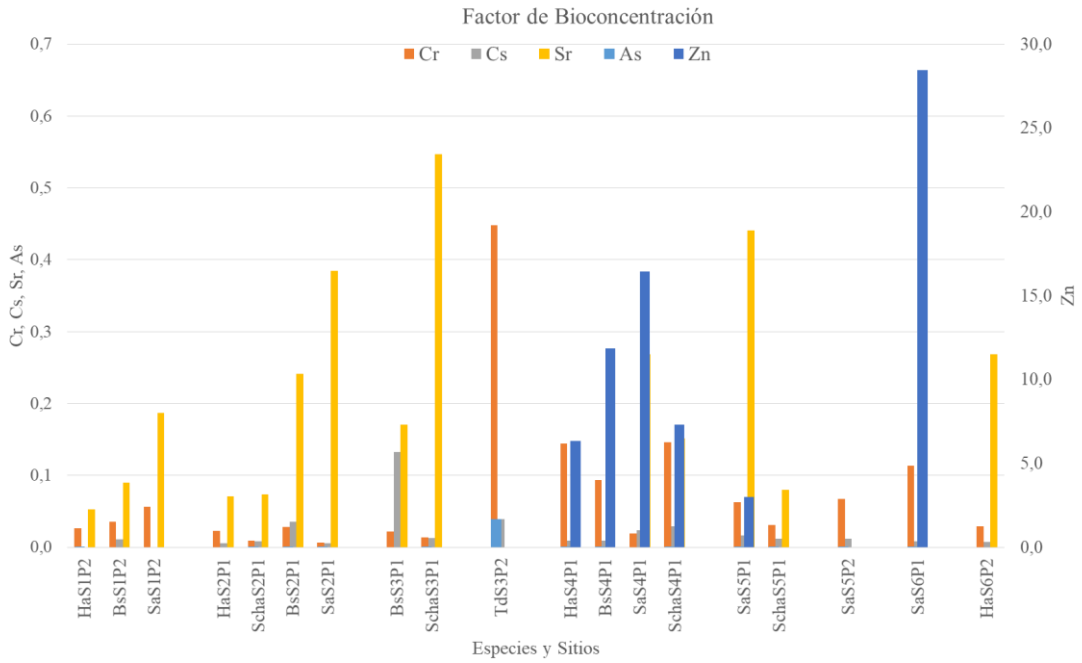


Figura 3. Factor de Bioconcentración (FBC) de los diferentes elementos analizados (Cr, Cs, Sr y Zn, en cada especie vegetal (*Hyalis argentea*, Ha; *Schinus areira*, Scha; *Baccharis salicifolia*, Bs; *Typha dominguensis*, Td; *Senna aphylla* Sa) y cada sustrato de los sitios muestreados (S1P2, S2P1, S3P1, S4P1, S5P1, S5P2, S6P1 y S6P2).

Senna aphylla, estuvo presente en seis de los nueve sitios analizados, donde los FBC>1 para Zn estuvieron en S4P1, S5P1 y S6P1 con valores de 16.5, 3,0 y 28.5 respectivamente, en S5P2 el FBC para Zn fue de 0.8, muy cercano a la unidad. En S1P2 el FBC para Cr, Sr y Zn fue de 0.1, 0.2 y 0.3 respectivamente; En S2P1 los valores de FBC para Sr y Zn fueron de 0.4; en S4P1 y S5P1 el valor de FBC para Sr fue de 0.3 y 0.4 respectivamente; en S5P2 el valor de FBC para Cr fue 0.1 y en S6P1 los valores de FBC para Cr y Sr fueron de 0.1 y 0.6 respectivamente.

Factor de Translocación de Ar, Cr, Cs, Sr y Zn en *Hyalis argentea, Typha dominguensis, Schinus areira, Bacharis salicifolia* y *Senna aphylla.*

En la Figura 4 se logran identificar las especies que superaron el valor de la unidad en los FT, este factor nos dice que especies y en qué proporción están movilizando los elementos desde la raíz a la parte aérea.

Hyalis argentea, en S1P2 mostro un FT>1 para As, Cr, Sr y Zn de 2.8, 1.0, 1.9 y 1.5 respectivamente; en S2P1 los FT fueron para Cs, Sr y Zn de 3.0, 1.7, y 2.3 respectivamente; para S4P1 los FT>1 son para As, Cs, Sr y Zn con valores de 2.6, 5.2,

2.8 y 3.8 respectivamente; en S6P2 los FT>1 en Cr, Cs, Sr y Zn son de 1.1, 2.7, 1.3 y 2.8 respectivamente.

Typha dominguensis, para Sr presento un FT> 1 de 1.5 en S3P2.

Schinus areira mostró un FT>1 para todos los elementos analizados en S2P1, As (1.8), Cr (2.2), Cs (1.9), Sr (4.3) y Zn (5.0); el FT>1 en S3P1 en As, Cs, y Zn con valores de 1.4, 4.4, 6.5; S4P1 tuvo valores de FT>1 para As (3.1), Cs (2.1), Sr (4.3) y Zn (2.2); los valores de FT>1 en S5P1 son par As (3.0), Cs (4.2), Sr (5.6) y Zn (3.2).

Baccharis salicifolia en S1P2 tuvo los FT>1 para Cr, Cs, Sr y Zn de 1.5, 2.5, 1.5 y 1.0 respectivamente; para S2P1 no hubo valores mayores a uno y en S3P1 el FT para el Sr es de 1,1; en S4P1 los FT>1 son para Cs (2.1), Sr (2.8) y Zn (3.0).

Senna aphylla en S1P2 con FT>1 para Sr (1.) y Zn (1.9); en S2P1 con FT>1 para Cr (3.6) y Cs (1.3); en S4P1 los FT>1 son para Cr (2.1) y Zn (1.1); S5P1 tiene FT>1 para Cs (2.3) y Zn 3.0; de igual manera S5P2 tiene FT>1 para Cs (2.6) y Zn (4.0) y por último S6P1 presento los FT>1 en Cs (2.8) y Zn (3.9).

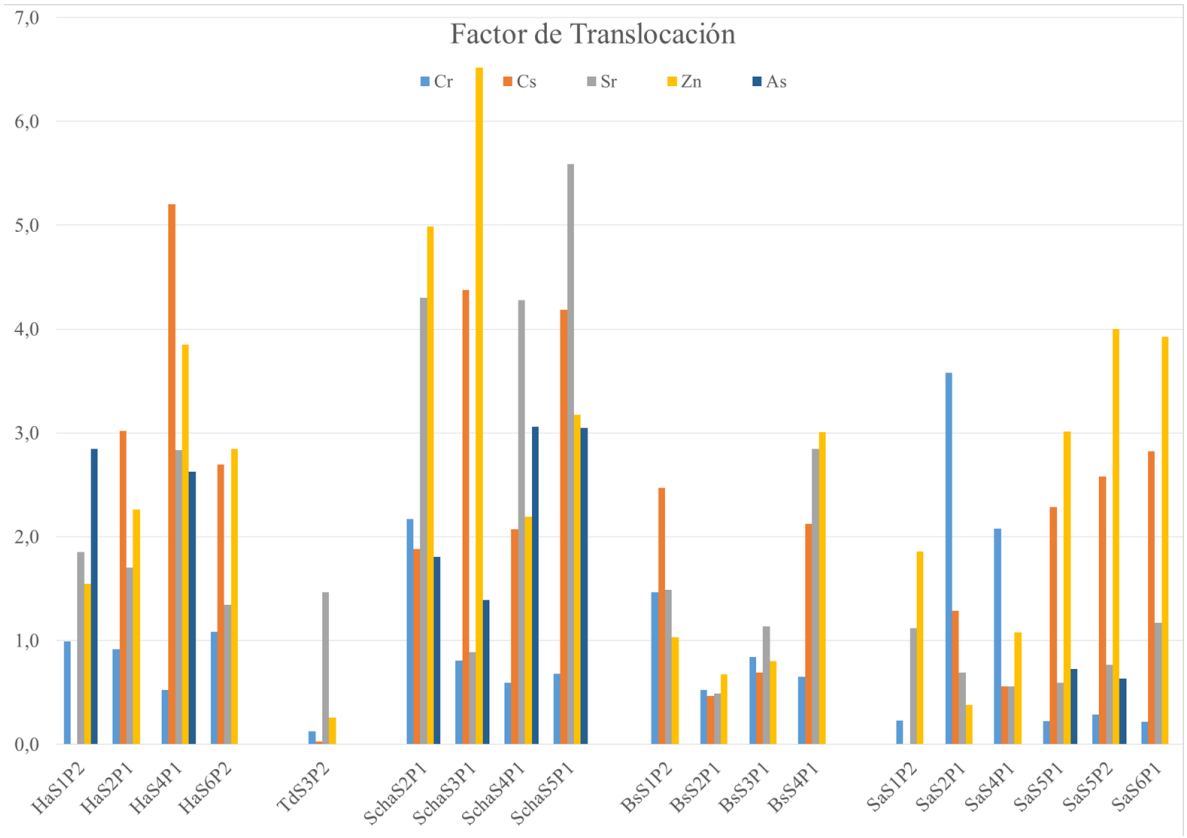


Figura 4. Factor de Translocación (FT) de los diferentes elementos analizados (Cr, Cs, Sr y Zn, en parte aérea y parte radícular de la vegetación analizada (*Hyalis argentea*, Ha; *Schinus areira*, Scha; *Baccharis salicifolia*, Bs; *Typha dominguensis*, Td; *Senna aphylla* Sa) y cada uno de los sitios muestreados (S1P2, S2P1, S3P1, S4P1, S5P1, S5P2, S6P1 y S6P2).

H. argentea, S. areira y *S. aphylla* translocaron desde la raíz a su parte aérea Zn, con excepción de *S. aphylla* en S2P1. *S. areira* también manifestó capacidad de translocación de As, Cs y Sr en todos los sitos; *H. argentea* también pudo translocar Cs y Sr.

Excepto *T. dominguiensis* en S3P2 y *S. aphylla* en S4P1 , todas las especies en todos los sitios tienen capacidad de translocar a la parte aérea el poco Cs que pasa del suelo a la raíz (Tabla 4), la presencia de Cs en el suelo y su asimilación por la vegetación es un proceso influenciado por diversos factores, incluyendo la disponibilidad de cationes competidores, el tipo de suelo y la especie de planta; además, la disponibilidad de Cs en el suelo puede variar dependiendo del tipo de suelo y de la geología de la zona. Por ejemplo, suelos ricos en materia orgánica y suelos arcillosos tienden a retener cationes como el Cs más eficientemente que los suelos arenosos.

Por lo general la asimilación de estos elementos As, Cr, Cs, Sr y Zn por parte de la vegetación depende de factores que incluyen, el tipo de suelo, el pH, porcentaje de MO, la disponibilidad de otros cationes competitivos; acá se logra identificar que una misma especie tiene diferentes valores en los FBC y FT, dependiendo del sitio de muestreo a pesar de ser vegetación nativa del CMFSR:

Las plantas excluidoras de metales con un bajo potencial de extracción de metales pueden ser eficientes para fines de fitoestabilización (Ali *et al*. 2013). Además, la eficacia de la fitoextracción también se reducirá cuando los metales se retengan dentro de las raíces en lugar de transportarse a las partes aéreas. La fitoestabilización minimiza la acumulación de metales pesados en la biota y su lixiviación a aguas subterráneas, limitando su movimiento. En realidad, la fitoestabilización es una estrategia de gestión para estabilizar contaminantes tóxicos y no es una solución permanente, porque los metales pesados permanecen en el suelo (Ali *et al*. 2013; Awa y Hadibarata 2020).

De todas las tecnologías de rehabilitación disponibles, la fitoestabilización es la capacidad de una planta para evitar la exposición de contaminantes al medio ambiente al no trasladar metales del suelo a las partes aéreas (Kurek & Majewska, 2012; Yoon *et al*., 2006).

Aunque no se ha presentado ningún valor científico para el valor de los metales en las raíces para determinar exactamente el excluidor de metales, las plantas con las concentraciones más altas de elementos en sus raíces en combinación con un valor de FBC>1 pueden tener el potencial de excluir metales. Las plantas excluidoras de metales con un bajo potencial de extracción de metales pueden ser eficientes para fines de fitoestabilización. Además, la eficacia de la fitoextracción también se reducirá cuando los metales se retengan dentro de las raíces en lugar de transportarse a las partes aéreas.

CONCLUSIONES

La vegetación nativa del CMFSR presenta características para considerarla herramienta potencial para la fitorremediación sea esta acumuladora y/o excluidora de As, Cr, Cs, Sr y Zn.

H. argentea se identificó en S4P1 como acumuladora de Zn (FBC 6,3). Excluidora de As, Cr y Cs en S1P2, S2P1, S4P1 y S6P2. Translocadora de Sr y Zn en S1P2, S2P1, S4P1 y S6P2.
T. dominguensis se identificó en S3P2 cómo acumuladora de As (FBC 1,6). Excluidora de Cs y con capacidad de translocar Sr.

S. areira se identificó en S4P1 y S5P1 como acumuladora de Zn (FBC 7,3 y 3,4). Excluidora de As, Cr y Cs en S2P1, S3P1, S4P1 y S5P1. Tranlocadora en S4P1, S5P1 para Sr y As y Cs en S2P1, S3P1, S4P1 y S5P1.

B. salicifolia se identificó en S4P1 acumuladora de Zn (FBC 11,8). Excluidora en S2P1 de Cr, Cs, Sr y Zn; S3P1 Cr, Cs y Zn y Translocadora en S4P1 Cs, Sr y Zn; Sr en S3P1 y en S1P2 Cr, Cs, Sr y Zn.

Senna aphylla Se identificó en S4P1 y S6P1 acumuladora de Zn (FBC 16,4 y 2,9). Excluidora en S1P2, S2P1, S4P1, S5P1, S5P2 y S6P1 de As, Cr y Cs y translocadora en S6P1 de Cs y Zn.

Los resultados nos permiten proyectar posiblemente el uso de enmiendas para potenciar la capacidad fitorremediadora de As, Cr, Cs, Sr y Zn con estas especies

Tabla 2. Concentración de As, Cr, Cs, Sr y Zn en ug/g en raíz y parte aérea de cada una las plantas cosechadas en el CMFSR.

REFERENCIAS

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2004. Reseña Toxicológica del Estroncio (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

Ali, H., Khan, E., y Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals— Concepts and applications. Chemosphere, 91(7), 869–881. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075

Ali, H., y Khan, E. (2018). Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. Environmental Chemistry Letters, 16(3), 903–917. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0734-7

Awa, S. H., y Hadibarata, T. (2020). Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: A Review. Water, Air, & Soil Pollution, 231(2), 47–47. https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0

Baker A, J.M. (1981). Accumulators and excluders strategies in the responses of plants to heavy metals. *J Plant Nutr*, 3, 643-654

Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R. y Smith, J.A.C. Metal Hyperaccumulator Plants: A Review of the Ecology and Physiology of a Biological Resource for Phytoremediation of Metal-Polluted Soils. En: Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. (eds Terry, N. y Bañuelos, G.), 85-107 (2000).

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., y Lux, A. (2007). Zinc in plants. New Phytologist, 173(4), 677–702. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x

Brooks, R.R., Lee, J., Reeves, R.D. and Jaffre, T. Detection of Nickeliferous Rocks by Analysis of Herbarium Specimens of Indicator Plants. *J. Geochem. Exploration* 7: 49-57 (1977).

Butterman, W. C., Brooks, W. E., Reese, R. G., Mineral Commodity Profile, Cesium, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey EE.UU. 2005.

Casado-Izquierdo, JM; Hernández-Juárez, M; Ortiz-Pérez, MA; Oropeza-Orozco, O; Quintero-Pérez, JA; Sánchez-Salazar, T; Sommer-Cervantes, I. 2008. Validación en campo de variables e índices de vulnerabilidad en sitios ambientalmente sensibles a derrames de hidrocarburos en la región de Coatzacoalcos. Ciudad de México, México, INE. 65 p.

Castaño, A. R.a Invernizzi, R.b Plá, R.c Olmedo Mb, Jasan. Rb. 2021. *Senecio subulatus* y *Senecio pampeanus* Especies Fitorremediadoras de Estroncio (sr) en el sur de Mendoza. Actas de trabajos completos del E-ICES 16, - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2021. ISBN 978-987-1323-86-9.

Environment Canada, 1991. Review and Recommendations for Canadian Interim Environmentals Quality Criteria for Contaminated Sites. Scientific Series N° 197. IWD - WQB. Ottawa.

IAEA (International Atomic Energy Agency). Guidelines for Remediation Strategies to Reduce Radiological Consequences of Environmental Contamination IAEA, Vienna (2012.).

I-La Terraza: Distrito Uranífero Sierra Pintada, provincia de Mendoza. Revista de la CNEA(51-52), 21-31.

Jobby, R., Jha, P., Yadav, A. K., y Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: A comprehensive review. Chemosphere, 207, 255–266. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.050

Kabata-Pendias, Alina & Mukherjee, A.B.. (2007). Trace Elements from Soil to Human. 10.1007/978-3-540-32714-1.

Kleiman, L E. Mineralogía y petrología del volcanismo permo-triásico del bloque de San Rafael en el área de Sierra Pintada, Provincia de Mendoza y su relación con las mineralizaciones de uranio. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. (1999).

Kleiman, L.E. 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, (1993).Mendoza.

Korobova, E., Ermakov, A. and Linnik. V. 137-Cs and 90-Sr mobility in soils and transfer in soil-plant systems in the Novozybkov district affected by the Chernobyl accident. *Appl. Geochem*., 13, 803-814. (1998).

Kurek. E; M. Majewska Microbially Mediated Transformations of Heavy Metals in Rhizosphere A. Zaidi, P.A. Wani, M.S. Khan (Eds.), Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation, Springer, Vienna (2012), pp. 129-146.

Mansilla, M. y Dieguez, S. 2013. Modelamiento geológico mediante "software" minero del sector Tigre.

Mendoza-Carranza, M; Sepúlveda-Lozada, A; Días-Ferreira, C; Violette, G. 2016. Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: a case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico. Environmental Pollution 210:155-165. DOI: http:// doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.014.

Mohanty, M., Kumar, N., Patra, P., Das, B., & Rama, P. (2010). Phytoremediation: A Novel Approach for Utilization of Iron-ore Wastes. En David Whitacre. (Ed.), Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Volumen 206 (pp. 29 –-44). Amsterdam, The Netherlands: Springer Science & Business Media.

Moyen, C. Roblin, G. Uptake and translocation of strontium in hydroponically grown maize plants, and subsequent effects on tissue ion content, growth and chorophyll a/b ratio: comparison with Ca effects. Environmental and Experimental Botany, 28, 247-257, (2010).

Olguín, EJ; Hernández, ME; Sánchez-Galván, G. 2007. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 23(3):139-154.

Sasmaz, M., Sasmaz, A.,. The accumulation of strontium by native plants grown on Gumuskoy mining soils. J. Geochem. Explor. 181, 236–242, (2017).

Sparks, D.L. (2003) Environmental Soil Chemistry. 2nd Edition, Academic Press, Oxford. https://doi.org/10.1016/B978-012656446-4/50001-3

Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

West, H.K., Davies, M.S., Morgan, A.J., Herbert, R.J. The relationships between Sr and Ca accumulation in the major constituents of a terrestrial community residen ton a celestitic (SrSO4) soil in S.W. England. *European Journal of Soil* Biology, 37, 333-336, (2001).

Yoon J., X. Cao, Q. Zhou, L.Q. Ma Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site Science of the Total Environment, 368 (2) (2006), pp. 456-464

Agradecimientos

Al personal del CMFSR, al personal del herbario El Herbario MERL, acrónimo de Mendoza Ruiz Leal, del AIDIZA y obviamente a la Comisión Nacional de Energía Atómica por permitirnos generar conocimiento en aras del medioambiente.

BÚSQUEDA POR NOVEDAD PARA LA PREDICCIÓN DE FENÓMENOS

Paola Caymes-Scutari[a,b], Jan Strappa[a,b], Germán Bianchini[a]

[a]*Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET, ARGENTINA)*
e-mail: pcaymesscutari@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

La predicción de fenómenos naturales conlleva la necesidad de contar con datos que describan la situación inicial del fenómeno para que los expertos en la materia puedan tomar decisiones informadas en cuanto a evacuaciones, frentes de fuego, etc., y así intentar paliar los posibles efectos negativos que pueda ocasionar el fenómeno. Dada la complejidad que involucra este tipo de predicciones y el gran volumen de información a considerar en la toma de decisiones, existen herramientas informáticas basadas en ciencia computacional, que permiten entrelazar los datos con el conocimiento experto, a través del modelado y la simulación de los fenómenos y la automatización en la gestión de los datos, el procesamiento y análisis de los mismos, para proveer una respuesta. La forma clásica de realizar una predicción considera el estado inicial del fenómeno, el cual constituye la entrada de un programa de simulación, que como resultado de su ejecución arroja el estado que se predice para el instante siguiente. Este tipo de predicción suele ser limitada en cuanto a la precisión de los resultados. Existen diversos métodos que enriquecen esta forma básica de predicción, mediante diferentes técnicas. En particular, existe una familia de métodos de múltiple solución solapada (DDM-MOS), que combinan computación evolutiva, estadística y computación paralela para tomar decisiones de acuerdo al resultado de un conjunto de simulaciones, en lugar de considerar una única instancia como lo efectúa el método clásico. En este trabajo, presentamos una nueva componente a incorporar a dichos métodos que potencia la calidad de predicción en tiempo de ejecución y en precisión: la búsqueda por novedad o novelty search.
.

Palabras Clave: Novelty Search, Paralelismo, Incendios Forestales, HPC, Fenómenos de Propagación.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de búsqueda exacta o exhaustiva permiten hallar soluciones exactas al problema bajo estudio. Sin embargo, suelen presentar ejecuciones muy prolongadas y/o ineficientes, que incluso pueden llegar a ser difíciles o imposibles de aplicar. Las **metaheurísticas** son una familia de algoritmos aproximados de propósito general, muchos de ellos inspirados en el comportamiento o funcionamiento de sistemas de la naturaleza (Talbi E., 2009). Estos algoritmos permiten guiar y combinar estrategias inteligentes y probabilísticas para explorar y explotar el espacio de búsqueda, por lo que constituyen una alternativa a los métodos de búsqueda exactos o exhaustivos. Si bien no aseguran encontrar la solución óptima, poseen un alto grado de confianza dado que permiten encontrar soluciones de calidad aceptable con un costo computacional más razonable que el requerido por los métodos exactos. Para obtener buenas soluciones, cualquier algoritmo de búsqueda debe establecer un balance adecuado entre dos

características contrapuestas del proceso, representadas en la Fig. 1.a y 1.b, de acuerdo a (Herrera F., 2023). Por un lado, la **intensificación**, que puede interpretarse como la cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda en la región actual (búsqueda local o explotación del espacio). Por otro lado, la **diversificación** representa la cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda en regiones distantes del espacio (búsqueda global o exploración del espacio).

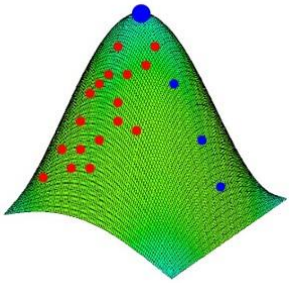
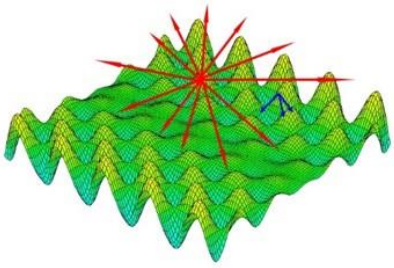
a.  **b.** 

Figura 1. Representación gráfica de: **a.** la intensificación y **b.** la diversificación en el proceso de búsqueda.

El equilibrio entre intensificación y diversificación es necesario para identificar rápidamente regiones del espacio con soluciones de buena calidad, y para no consumir mucho tiempo en regiones del espacio no prometedoras o ya exploradas. Según su naturaleza, las metaheurísticas aplican distintas estrategias para obtener un buen balance entre intensificación y diversificación. Tal es el caso de una familia particular de metaheurísticas constituida por los **algoritmos evolutivos poblacionales (AEP)**, los cuales basan su funcionamiento en la supervivencia de los individuos más aptos, según señala la teoría de la evolución darwiniana (Talbi E., 2009). Para ello, los AEP consideran una población de individuos (o muestra de posibles soluciones dentro del espacio de búsqueda; en las Fig. 1.a y 1.b los individuos de la población están representados por puntos, y el espacio de búsqueda por planos cuadriculados y coloreados en verde). A lo largo de un proceso iterativo que implementa la evolución generacional, los individuos son sometidos a diferentes operadores que realizan modificaciones (algunas menores y otras mayores) en los individuos, a fin de balancear la intensificación y la diversificación, y una función de aptitud es la que permite evaluar la calidad de cada individuo, y así guiar cuáles prevalecerán y cuáles irán perdiendo importancia en las sucesivas actualizaciones de la población. En la Fig. 2, de acuerdo a (Eiben A. and Smith J., 2003), se ilustra de forma general el efecto que se espera del proceso evolutivo de una población de individuos (representada por los puntos sobre la curva) en el espacio de búsqueda (espacio unidimensional en este ejemplo, representado por la curva) en tres momentos particulares de la evolución.

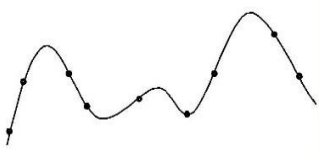
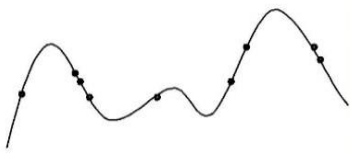
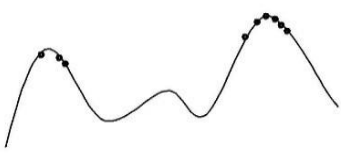
a.  **b.**  **c.** 

Figura 2. Distribución de la población en el proceso de búsqueda **a.** en la fase inicial, **b.** en la fase intermedia, y **c.** en la fase final.

Al inicio de un AEP, usualmente la población se inicializa de forma estocástica, por lo que en la fase inicial o temprana de la evolución la población se distribuye uniformemente en el espacio de búsqueda (Fig. 2.a). A medida que transcurren sucesivas iteraciones o generaciones evolutivas, la intensificación y la diversificación comienzan a dejar su impronta señalando ciertos sectores que pueden resultar prometedores para la búsqueda, como los puntos que comienzan a concentrarse en algunas regiones de la Fig. 2.b. Finalmente, en la fase final de la evolución la población suele concentrarse en los óptimos, ya sean globales o locales (Fig. 2.c), a partir de los cuales se habrá encontrado la solución óptima en el mejor de los casos, o una solución aceptable en caso contrario. Sin embargo, alcanzar el equilibrio entre intensificación y diversificación no resulta sencillo y suele requerir un gran esfuerzo si se desea evitar demoras innecesarias en la búsqueda o incluso que la búsqueda fracase. En este sentido, los AEPs pueden sufrir de dos fenómenos denominados estancamiento y convergencia prematura. El estancamiento se manifiesta cuando la metaheurística resulta incapaz de encontrar soluciones mejores que las anteriores, aun cuando los individuos de la población sean diversos. Por su parte, la convergencia prematura se presenta cuando la metaheurística converge demasiado rápido, y puede suceder que se alcance un óptimo local. En ambos casos se produce un efecto negativo tanto en el proceso de búsqueda (ilustrado en la Fig. 3), como en el tiempo de cómputo que se ve degradado con iteraciones infructuosas.

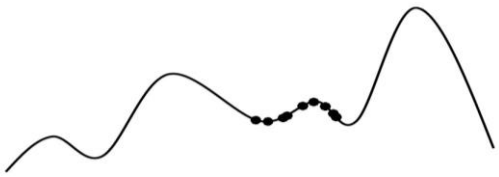


Figura 3. Resultado gráfico de dos problemas típicos que pueden presentarse en los algoritmos evolutivos poblacionales: estancamiento y convergencia prematura.

Los conceptos de diversificación, intensificación, estancamiento, convergencia prematura, etc., resultan de interés particular para este trabajo, dado que se desea utilizar un AEP para guiar la predicción de incendios forestales, para alcanzar un resultado confiable en un tiempo de cómputo razonable, y por lo tanto resulta primordial equilibrar las causas y/o efectos de cada factor. En la sección siguiente, presentamos por un lado la familia de métodos predictivos DDM-MOS (Bianchini G. et al, 2010) (Strappa J. et al, 2022), que combinan distintas estrategias estadísticas, de computación evolutiva, y de paralelismo para potenciar la calidad en la predicción de fenómenos de propagación, como pueden ser los incendios, las inundaciones, o las avalanchas. Y por otro lado presentamos ESS-NS (Strappa J. et al, 2022), uno de los métodos en particular, que incorpora búsqueda por novedad (Lehman J. and Stanley K., 2011 and 2008) o *novelty search* en la metaheurística, el cual constituye el objeto de estudio de este trabajo. Posteriormente presentamos los experimentos y resultados obtenidos, y finalmente se presentan las principales conclusiones del trabajo.

MÉTODOS DE PREDICCIÓN: DDM-MOS Y ESS-NS

En esta sección se presentan de forma general las características y funcionamiento de los DDM-MOS, y posteriormente se hace foco en el método particular ESS-NS y la búsqueda por novedad.

MÉTODOS CONDUCIDOS POR DATOS CON MÚLTIPLES SOLUCIONES SOLAPADAS (DDM-MOS)

El ambiente y los ecosistemas pueden verse fuertemente impactados y alterados por la ocurrencia de incendios forestales, buena proporción de los cuales son, lamentablemente, provocados por causas antropogénicas. La prevención y la mitigación de los incendios forestales requieren de la predicción del comportamiento de los mismos, a fin de tomar decisiones informadas para su manejo para así intentar contrarrestar los efectos negativos sobre el medio ambiente. La complejidad para lograr la predicción radica en la necesidad de detectar tempranamente el evento, en la dificultad para disponer de datos actualizados del incendio y del entorno, y en el nivel de incertidumbre relativo a la cantidad de variables necesarias para interpretar el fenómeno a través de un modelo de simulación computacional, incertidumbre fundada en la dificultad de medir los valores de las variables con exactitud, las limitaciones computacionales para su implementación, etc. (Bianchini G. et al, 2010). En los últimos años hemos desarrollado un conjunto de métodos para la reducción de incertidumbre, los DDM-MOS (*Data Driven Methods with Multiple Overlapped Solutions*) (Bianchini et al, 2010) (Strappa J. et al, 2022). En este artículo se considera el caso de aplicación de la predicción de incendios forestales, pero tales métodos podrían utilizarse también para predecir otros tipos de fenómenos de propagación, como avalanchas, aludes, o inundaciones, por ejemplo. Los DDM-MOS son métodos computacionales predictivos con reducción de incertidumbre, la cual consiguen realizando la predicción de la línea de fuego no en base a un único conjunto de valores de entrada, sino a múltiples combinaciones estimadas de ellos y a la agregación de las múltiples soluciones que arroja cada una de dichas combinaciones, según se ilustra de forma general en la Fig. 4. En dicha figura, la sigla *SI* representa al simulador de incendios, *LFR* representa la línea de fuego real, y *LFP* constituye la salida del sistema, o línea de fuego predicha. A la izquierda del gráfico puede apreciarse una población de individuos (también denominados escenarios, y conformados por diferentes combinaciones de valores en los parámetros de entrada que describen el estado del incendio para el simulador, como velocidad y dirección del viento, humedad, etc.), que constituyen una muestra de puntos en el espacio de búsqueda. Dado que la cantidad de combinaciones posibles de valores de parámetros constituye un espacio de búsqueda de tamaño considerable, la búsqueda exhaustiva de una solución resulta prohibitiva y en consecuencia se trabaja de forma muestral, realizándose múltiples simulaciones, cada una bajo las diferentes combinaciones de valores consideradas como entrada (en general se trata de combinaciones aleatorias). Para cada una de dichas combinaciones, el simulador *SI* arroja un resultado generalmente diferente (lo cual se representa en el centro de la Fig. 4 con varios recuadros *SI*), y por lo tanto el sistema debe analizar los resultados de todas ellas y determinar la tendencia. Es por ello que, en los DDM-MOS, la funcionalidad del

simulador se encuentra complementada y enriquecida por metaheurísticas, estadística y paralelismo, como muestra la Fig. 4. Las metaheurísticas (Talbi E., 2009) se utilizan para orientar la búsqueda dentro del gran espacio de búsqueda hacia mejores soluciones, en base a la calidad de las múltiples simulaciones obtenidas. El cómputo paralelo brinda la potencia necesaria para ejecutar las múltiples simulaciones en paralelo y acelerar el procesamiento de la información. Y la Estadística se utiliza para obtener el patrón de comportamiento de la línea de fuego en base a los resultados obtenidos en las múltiples simulaciones realizadas para los diferentes escenarios. Asimismo, algunos DDM-MOS incorporan el uso de técnicas de Sintonización (Naono K. et al, 2010) (Caymes-Scutari P. et al, 2016) a fin de mejorar su rendimiento frente a otros métodos, y en pos de brindar un resultado de mayor calidad y utilidad.

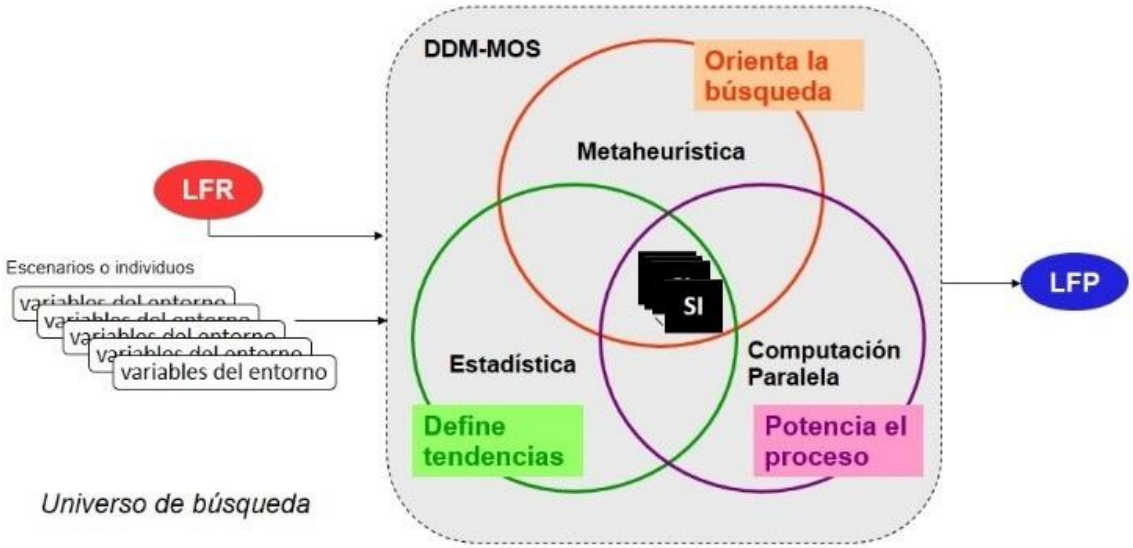


Figura 4. DDM-MOS (Métodos Conducidos por Datos con Múltiples Soluciones Solapadas)

Cada DDM-MOS se caracteriza por el nivel de utilización que posee de elementos de Estadística, Computación Evolutiva y Metaheurísticas, Paralelismo, y Sintonización, que imprimen mejoras ya sea en cuanto a calidad de predicción, tiempo de ejecución, y/o utilización de recursos. En este artículo hacemos foco en un método estadístico-evolutivo, denominado ESS-NS. Este método utiliza como metaheurística un algoritmo evolutivo clásico, el cual incorpora búsqueda por novedad (Lehman J. and Stanley K., 2011 and 2008). En la siguiente sección se describen sus características.

ESS-NS

ESS-NS (*Evolutionary Statistical System based on Novelty Search*) (Strappa J. et al, 2022) es un método predictivo de la familia de los DDM-MOS, el cual considera la posibilidad de utilizar un paradigma alternativo al de las metaheurísticas tradicionales: la *búsqueda basada en novedad* o *Novelty Search* (NS) (Lehman J. and Stanley K., 2011 and 2008). Este es un paradigma de búsqueda que ignora el objetivo como guía para la exploración y, en su lugar, recompensa a soluciones candidatas que presentan comportamientos novedosos (diferentes a los anteriormente descubiertos), con el fin de maximizar la

exploración y evitar óptimos locales. La búsqueda basada en novedad es una alternativa prometedora frente a las limitaciones de las metaheurísticas aplicadas previamente al problema de la predicción, debido a que, en este paradigma alternativo, la búsqueda es dirigida por una caracterización del comportamiento de los individuos, cambiando así el *paisaje de la función de fitness* (*fitness landscape*), previniendo de manera directa los problemas de convergencia prematura y estancamiento, como ilustra la Fig. 5 con los puntos que se encuentran aislados del resto, generando espacios de búsqueda novedosos, independientemente de su *fitness*.

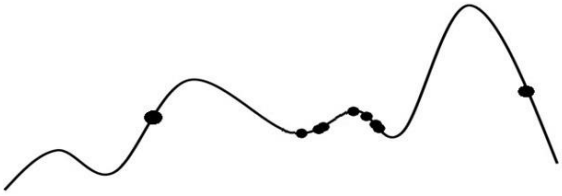


Figura 5. Representación gráfica del efecto de la búsqueda por novedad en el proceso de búsqueda, previniendo el estancamiento y/o la convergencia prematura.

Para guiar la búsqueda por novedad, es necesario definir una función para evaluar el nivel de novedad de cada individuo. Esta medida de novedad es dependiente del problema, usualmente se denomina *dist* en la literatura, y puede ser por ejemplo la diferencia entre el *fitness* respectivo de los individuos. Una función frecuentemente utilizada es la presentada en la Ec. (1) de acuerdo a Leman J. and Stanley K., 2008. En dicha expresión, para cada individuo *x*, se calcula la distancia promedio a sus *k* vecinos más cercanos, donde μ_i es el *i*-ésimo vecino más cercano de *x* de acuerdo a la función *dist*. El parámetro *k* puede tener un valor determinado, o bien puede considerar la población completa.

$$\rho(x) = \frac{1}{k}\sum_{i=0}^{k-1} dist(x, \mu_i) \qquad \textbf{(1)}$$

Para realizar esta evaluación, además de considerarse la población actual, el algoritmo también considera los individuos que resultaron novedosos en las iteraciones previas de la ejecución, almacenados en un archivo de soluciones novedosas. Esta valoración de la novedad presente y previa es precisamente lo que permite mejorar el equilibrio entre intensificación y diversificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección presentamos algunos resultados obtenidos con ESS-NS en contraste con los resultados obtenidos con otros métodos existentes, como ESS, ESSIM-DE y ESSIM-EA. Interesa comparar ESS-NS con ESS dado que se trata de su predecesor directo, ambos consideran una única población, paralelismo simple, y la metaheurística de base es un algoritmo evolutivo clásico, en el caso de ESS-NS enriquecido con NS. Por su parte, también interesa compararlo con ESSIM-DE y ESSIM-EA dado que son métodos que consideran múltiples poblaciones, dos niveles de paralelismo con islas, y sus metaheurísticas son la evolución diferencial (Tardivo M.L. et al, 2017) y los algoritmos evolutivos (Mendez Garabetti et al, 2016) respectivamente, los cuales han

presentado resultados mejores a los obtenidos con ESS, ya sea en términos de calidad de predicción, tiempo de cómputo, o ambos aspectos.

Los experimentos consideran quemas controladas en campo realizadas en el marco del proyecto SPREAD (SPREAD, 2022). En la Fig. 5 puede apreciarse de forma general una instantánea del incendio considerado en este artículo, mientras que en la Tabla I se describen las características del lote y los intervalos de tiempo considerados en el transcurso del incendio para estudiar los estados intermedios del mismo.



Figura 6. Instantánea del caso de quema 520. Serra de Lousã (Gestosa, Portugal). Proyecto SPREAD (SPREAD, 2022).

Tabla I. Características del caso de quema 520.

Caso	Ancho (m)	Alto (m)	Pendiente (grados)	T. inicial (min.)	T. final (min.)	Incremento (min.)
520	89	109	21	2	14	2

Al iniciar el incendio se toma como dato de entrada la línea de fuego inicial y el mapa del terreno, juntamente con los parámetros que describen el estado del entorno (algunos de tales parámetros son medidos, mientras que otros son estimados). La quinta columna de la Tabla I señala que transcurridos dos minutos del inicio del incendio se tomará en consideración una instantánea del frente de fuego, a fin de poder estudiar su evolución y contrastarla con los resultados que arrojan los métodos ESS, ESSIM-DE, ESSIM-EA, y ESS-NS bajo estudio. De acuerdo a la última columna de dicha tabla, se captarán sucesivas instantáneas cada dos minutos hasta que el incendio llegue a su fin, en el minuto 14. Por lo tanto, la evolución del incendio se analiza en 6 pasos (o *steps*) sucesivos, de los cuales el primer paso es de inicialización del método predictivo, motivo por el que en los gráficos siguientes se analizan los resultados de los cinco pasos dedicados específicamente a la predicción. Cada uno de esos intervalos, están representados en la Fig. 6 con un color diferente, pudiéndose observar cómo el frente de fuego va evolucionando a lo largo del tiempo.

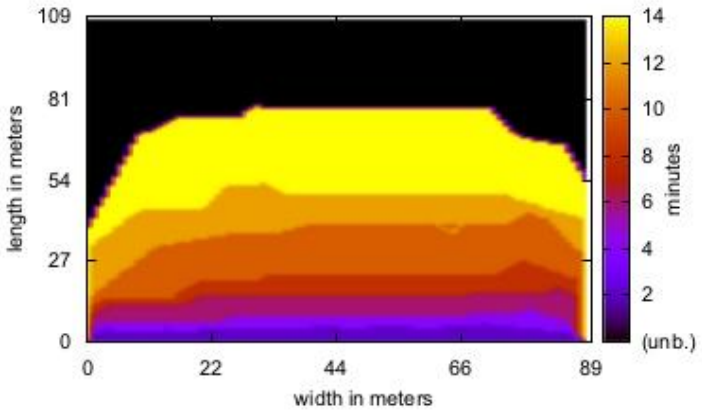


Figura 7. Frentes de fuego identificados en los sucesivos intervalos de tiempo, durante el incendio controlado del caso de quema 520.

Los resultados que se presentan corresponden a los valores promedio obtenidos a partir de la ejecución de 30 experimentos inicializados con diferentes semillas para cada método. Esto significa que cada uno de los métodos considerados en la comparación (ESSIM-DE, ESSIM-EA, ESS, y ESS-NS) se ejecutó en 30 oportunidades considerando cada vez una población inicial distinta, generada estocásticamente a partir de una semilla diferente. En base a esas 30 ejecuciones, se presentan los resultados promedio. En la Tabla II se documentan los parámetros de funcionamiento definidos para cada uno de los métodos, teniendo en cuenta las características particulares de cada uno de ellos. Para que la comparación sea justa, se han considerado los mismos valores para los parámetros de funcionamiento comunes siempre que tengan sentido de acuerdo a la naturaleza de cada método.

Tabla II. Configuración de los parámetros de ejecución de cada método predictivo.

Parámetro	**ESS-NS**	**ESS**	**ESSIM-EA**	**ESSIM-DE**
Tamaño de la población	200	200	200	200
Umbral de fitness	0.7	0.7	0.7	0.7
Probabilidad de mutación	0.4	0.5	0.5	-
Probabilidad de torneo	0.8	-	-	-
Cantidad de vecinos	199	-	-	-
Cantidad de islas	-	-	5	5
Cantidad de workers	40	40	7 por isla	7 por isla
Cr (Prob. de cruzamiento)	1	0.2 – 0.6	0.2 – 0.6	0.3
Frecuencia de migración	-	-	cada iteración	cada iteración
Inmigrantes	-	-	mejor individuo	20% de la población
Reemplazo de inmigrantes	-	-	elitista	semi-elitista
Topología de comunicación	-	-	anillo	anillo

Los experimentos fueron ejecutados en el Cluster LIDIC (UNSL), el cual cuenta con CPUs Intel de 64 bits Q9550 Quad Core, 2.83GHz, y 4GB RAM (DDR3, 1333MHz).

Los nodos están conectados mediante Gigabit Ethernet y un switch Linksys SLM2048 de 1 Gb. El sistema operativo es Debian Lenny (64-bit), y para el paso de mensajes entre los nodos se utiliza la librería MPICH (MPICH, 2022).

En las Fig. 8 y 9 se presentan los resultados obtenidos. La Fig. 8 permite estudiar la calidad de las predicciones obtenidas en los 5 sucesivos pasos de predicción (cada paso sucesivo representado en el eje de abscisas), mostrando con un color y trazo diferente los resultados para cada uno de los cuatro métodos considerados. Tales resultados corresponden al valor de fitness promedio de las 30 ejecuciones, es decir la aptitud o nivel de similitud entre la predicción arrojada por el método y el estado real del incendio en ese instante de tiempo. Cuanto más precisa sea la predicción, más cercano a 1 será su valor de fitness, mientras que un valor cercano a 0 indica una predicción muy distinta de la realidad. La Fig. 9 ofrece información desagregada representada en un diagrama de cajas, brindando un análisis complementario de la distribución del *fitness* alcanzado por las 30 ejecuciones en cada paso de predicción para cada método. Por su parte, en la Tabla 3 se documenta el tiempo de ejecución promedio de las 30 ejecuciones para cada uno de los métodos bajo estudio.

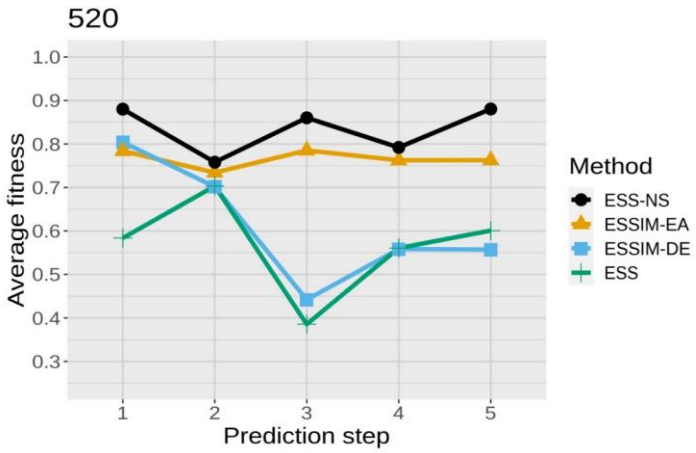


Figura 8. Fitness promedio de las 30 ejecuciones de cada método, en cada paso de predicción.

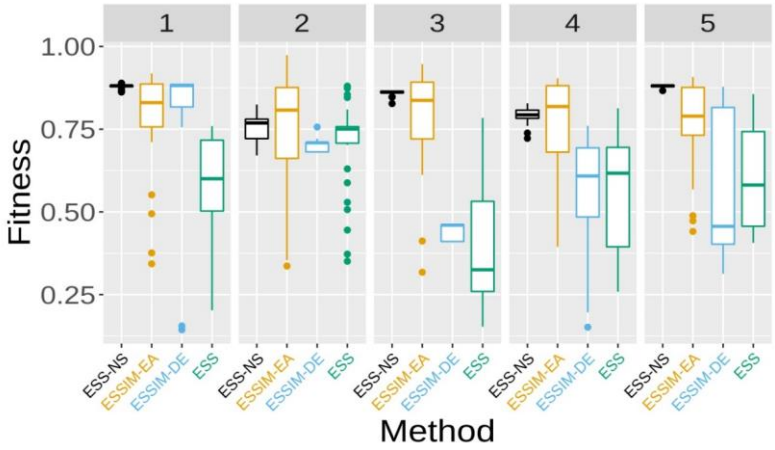


Figura 9. Distribución de las 30 ejecuciones de cada método, en cada paso de predicción.

 ISBN 978-987-1323-91-3

Tabla III. Tiempos de ejecución promedio para cada método comparado (hh:mm:ss). Promedio de 30 ejecuciones.

Mapa	ESS-NS	ESS	ESSIM-EA	ESSIM-DE
520	00:38:04	00:55:28	01:01:15	00:49:05

A partir del análisis de los resultados obtenidos es posible observar que, en términos generales, ESS-NS obtiene valores de fitness superiores a los de los otros métodos (Fig. 8), alcanzando en todos los instantes de predicción un nivel de similitud superior al 75% e incluso algunos de ellos cercanos al 90% de coincidencia con respecto al estado real del incendio. A su vez, puede apreciarse que ESS-NS resulta ser el algoritmo con un comportamiento más regular e independiente de las características de la población generada inicialmente (Fig. 9), ya que la caja correspondiente a ESS-NS ha resultado ser la más reducida y uniforme de los cuatro métodos, a lo largo de todos los pasos del proceso de predicción. Este comportamiento refleja la robustez del algoritmo, lograda gracias al almacenamiento de los mejores individuos hallados a lo largo de la evolución. A estos importantes resultados se suma la ganancia en tiempo de ejecución (Tabla III). ESS-NS obtiene una reducción de un 22% aproximadamente en los tiempos de cómputo respecto del más rápido de los otros métodos. Dicha ganancia de tiempo se logra gracias a las características del algoritmo que incluye la búsqueda por novedad, la cual propicia que se alcance más rápidamente el umbral de fitness, es decir el nivel de precisión deseado.

CONCLUSIONES

La ocurrencia de incendios forestales impacta y altera significativamente el medio ambiente y los ecosistemas. Para prevenirlos y mitigarlos, es crucial predecir su comportamiento y tomar decisiones informadas para su manejo. La predicción computacional es compleja, ya que requiere detección temprana, datos actualizados del incendio y su entorno, y considerar múltiples variables con un cierto nivel de incertidumbre en su medición, sin mencionar las limitaciones computacionales para su implementación. Los DDM-MOS (Data Driven Methods with Multiple Overlapped Solutions) constituyen una familia de métodos predictivos con reducción de incertidumbre, la cual consiguen realizando la predicción de la línea de fuego no en base a un único conjunto de valores de entrada, sino a múltiples combinaciones estimadas de ellos y a la agregación de las múltiples soluciones que arroja cada una de dichas combinaciones. Se trata de métodos que conjugan simulación, estadística, metaheurísticas evolutivas y paralelismo. En este trabajo presentamos un nuevo método denominado ESS-NS, el cual incorpora la búsqueda por novedad (NS) en la metaheurística. De esta manera, la búsqueda se encuentra orientada no sólo por la aptitud de los individuos de la población, sino que también se beneficia de la información que brindan los individuos que presentan comportamientos novedosos (diferentes a los anteriormente descubiertos), maximizando la exploración, evitando óptimos locales, y como consecuencia alcanzando el nivel de calidad deseado en un tiempo más reducido. En resumen, en este artículo hemos presentado resultados prometedores en base al diseño de un algoritmo genético novedoso basado en NS que

guía la evolución a través de la novedad. Las mejores soluciones halladas a lo largo de la evolución persisten y forman parte de la población resultante final. Los resultados son consistentes tanto en calidad como en tiempo de ejecución. Como trabajo futuro, proponemos aumentar la exploración a través de la incorporación de paralelismo jerárquico (mediante la utilización de un modelo de islas, por ejemplo). Y de forma más general se propone experimentar el efecto que pueda lograr la integración de NS a otras metaheurísticas, y asimismo extender la aplicación de esta aproximación a otros fenómenos de propagación, cambiando la caja negra del simulador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICET, UTN y FONCyT, por el soporte para la realización de este trabajo (beca postdoctoral, y proyectos SIUTIME0007840TC, TEUTIME0007658TC, SITCME0009816TC, TETEUME0008760TC, y UUMM-2019-00042).

REFERENCIAS

Bianchini, G., Denham, M., Cortés, A., Margalef, T., and Luque, E., Wildland Fire Growth Prediction Method Based on Multiple Overlapping Solution. Journal of Computational Science Vol 1 Issue 4, pp. 229-237. Elsevier. (2010).

Caymes-Scutari, P., Bianchini, G., Sikora, A., and Margalef, T., 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. (2016).

Eiben A., Smith J., What is an Evolutionary Algorithm?. In: Introduction to Evolutionary Computing. Natural Computing Series. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05094-1_2. (2003).

Herrera, F., Introducción a los algoritmos metaheurísticos, Grupo de Investigación "Soft Computing and Intelligent Information Systems, Universidad de Granada. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/191405/int-metaheuriisticas-caepia-2009-5718.pdf. Accedido en 2023.

Lehman J. and Stanley K. O., Abandoning Objectives: Evolution Through the Search for Novelty Alone, Evolutionary Computation, vol. 19, no. 2, pp. 189–223. (2011).

Lehman J. and Stanley K., Exploiting Open-Endedness to Solve Problems Through the Search for Novelty, Artificial Life, p. 8. (2008).

Mendez Garabetti, M., Bianchini, G., Caymes Scutari, P., Tardivo M. L., Increase in the quality of the prediction of a computational wildfire behavior method through the improvement of the internal metaheuristic, Fire Safety Journal, pp. 49-62. Elsevier. (2016).

MPICH—High-Performance Portable MPI. Disponible online: https://www.mpich.org/ Accedido en octubre 2022.

Naono, K., Teranishi, K., Cavazos, J. and Suda, R., Software Automatic Tuning: From Concepts to State-of-the-Art Results, Springer, New York. (2010)

SPREAD - Forest Fire Spread Prevention and Mitigation, SPREAD Project, Fact Sheet, FP5, CORDIS, European Commission. Available online: https://cordis.europa.eu/project/id/EVG1-CT-2001-00043. Accedido en Octubre 2022.

Strappa J., Caymes Scutari P., and Bianchini G., Evolutionary Statistical System based on Novelty Search: a Parallel Metaheuristic for Uncertainty Reduction Applied to Wildfire Spread Prediction, in Algorithms 2022, vol 15, issue 12, 478. MDPI. (2022).

Talbi, E., Metaheuristics: From Design to Implementation. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. (2009).

Tardivo M. L., Caymes Scutari P., Bianchini G., and Méndez Garabetti M., Hierarchical Parallel Model for Improving Performance on Differential Evolution, Concurrency and Computation: Practice and Experience 29 (10): e4087. (2017).

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL Y EL ESTADO DE LA VEGETACIÓN. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA. CÓRDOBA.

Lucía de Antueno[a] y Fernanda J. Gaspari[a]

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

e-mail: lucia.deantueno@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

La generación de sedimentos en la cuenca del río Ctalamochita es muy predominante dadas las elevadas pendientes y la morfología que permite la rápida concentración del agua precipitada. Además, esta zona está asociadas a una densa cobertura vegetal. El Índice de Vegetación Mejorado (EVI) es un indicador del estado de la vegetación sensible a los cambios de cobertura y/o biomasa a través del tiempo. Este trabajo analiza la relación existente entre la producción de sedimentos generados por erosión hídrica superficial con el estado de la vegetación. Para ello se empleó la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y el EVI, utilizando imágenes MYD09GA del sensor MODIS. El uso de éste se debe a que no se satura fácilmente en áreas con grandes cantidades de clorofila. Una vez obtenidos los valores mensuales se reclasificó en rangos para su conformación cartográfica. Por otro lado, las consideraciones de cobertura, uso de la tierra, y prácticas de conservación de suelos, que conforman los parámetros C y P, de la USLE, se determinaron usando el EVI. Luego, se realizó una tabulación cruzada entre mapas EVI y los mapas de erosionabilidad pluvial, erodabilidad del suelo y topográfico, dando, un carácter mensual y de variación espacial. Los resultados evidencian el comportamiento estacional de la pérdida de suelo. Entre los meses de diciembre y marzo, con valores de EVI más altos, la cuenca presenta una gran cantidad de zonas con nula, leve y moderada erosión hídrica. Mientras que, para los meses de julio a septiembre, cuando el EVI es mínimo, casi la totalidad de la cuenca presenta una pérdida de suelos máxima. El uso de EVI permitió identificar el estado de la cobertura vegetal, respecto de sus valores normales, y su respuesta ante cambios a la pérdida de suelo superficial.

Palabras Clave: EVI, USLE, MODIS

INTRODUCCION

La erosión del suelo se entiende como un proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos. Cuando dichos agentes son dinámicos, como la lluvia, a través del impacto de las gotas sobre la superficie, y el escurrimiento superficial, el suelo está expuesto a procesos de erosión hídrica (Ellison, 1947). Además, la cobertura vegetal es un factor importante a cuantificar, debido a que falta de vegetación que cubra y retenga el suelo, tiende a facilitar el proceso de degradación por erosión hídrica superficial.

El Índice de Vegetación Mejorado (EVI por su sigla en inglés, Enhanced Vegetation Index) es un indicador del estado de la vegetación sensible a los cambios de cobertura y/o biomasa a través del tiempo. Es un índice optimizado a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para reducir la influencia de la atmósfera, por ejemplo, por la dispersión de aerosol, optimiza la señal de la vegetación aumentando su sensibilidad en casos de altas densidades de biomasa, mediante la separación de la señal proveniente de la vegetación de la influencia atmosférica. El uso del EVI se debe a que no se satura fácilmente en áreas con grandes cantidades de clorofila, como las que se encuentran en el área de estudio.

Según De Antueno y Gaspari (2021), la parte alta de la cuenca del río Ctalamochita (CRC) tiene gran potencialidad en la generación de sedimentos dadas las amplias zonas con elevadas pendientes y la predominancia de una morfología que permite la rápida concentración del agua precipitada, lo cual favorece la erosión. Mientras que, en la parte baja, se exhibe una drástica disminución en las pendientes, asimilando el comportamiento hidrológico del sector con un sistema de llanura, favoreciendo la deposición de los sedimentos generados en áreas ocupadas por urbanizaciones creadas sin planificación del territorio. La CRC presenta una superficie de 10.573 km^2 y se encuentra en la zona centro sudeste de la provincia de Córdoba (Fig. 1).

El objetivo del trabajo es analizar la relación existente entre la producción de sedimentos generados por erosión hídrica superficial con el estado de la vegetación, en la CRC.

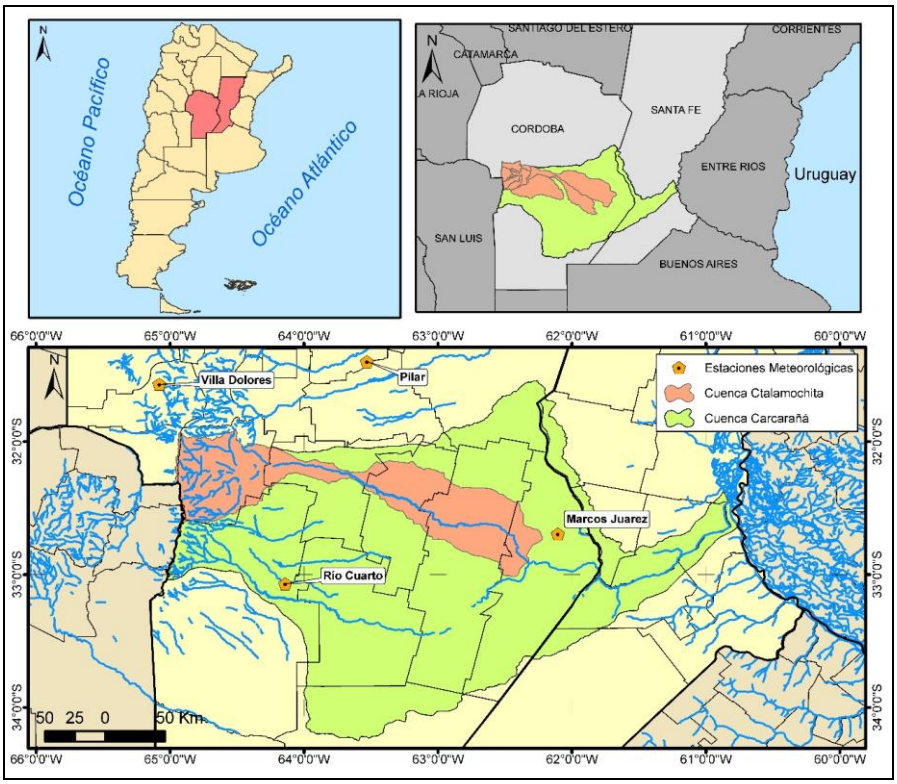


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ctalamochita en la cuenca del río Carcarañá. Fuente: De Antueno, L. 2019.

 ISBN 978-987-1323-91-3

La CRC se caracteriza por poseer un clima templado subhúmedo a húmedo, cuya precipitación media anual varían entre 700 mm a 900 mm, disminuyendo hacia el oeste, pero aumentando nuevamente en el Valle de Calamuchita a 900 mm, siendo los meses de mayores lluvias entre noviembre a abril. La temperatura media anual oscila entre los 17° C a los 19 °C de Este a Oeste (UNVM, 2015).

El principal uso de suelo es agrícola-ganadero, tanto en la región pedemontana de cuenca alta como en la región de llanura de la cuenca media y baja, siendo el primordial desarrollo socioeconómico, acentuándose más en las pequeñas poblaciones y las zonas rurales. En la cuenca alta, el uso de suelo en el Valle de Calamuchita es principalmente la forestación de pinos, así como también la ganadería. Sin embargo, el principal desarrollo socioeconómico de la región montañosa es el turismo, en este marco la actividad minera está restringida (UNVM, 2015). Además, en la parte alta de la cuenca hay dos sistemas hidroeléctricos que brindan el suministro de energía, el complejo Río Grande conformado por los embalses Cerro Pelado y Arroyo Corto y el sistema Río Tercero, constituido por los embalses Río Tercero, Ing. Cassaffousth, Ing. Benjamín Reolín y Piedras Moras (Díaz Lozada et al, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se empleó el EVI como un indicador del estado de la vegetación, siendo particularmente sensible a la cobertura vegetal, es decir, que los cambios, en el valor del índice de vegetación a través del tiempo permiten identificar si un campo en determinado mes o año, en términos de cobertura vegetal y/o biomasa, está en mejor o peor condición respecto de sus valores normales.

La estimación del EVI se realizó utilizando datos de imágenes del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo de la plataforma AQUA.

Las imágenes utilizadas son productos MODIS MYD09GA para las reflectancias diarias a 500 m. Estas imágenes se encuentran calibradas y disponibles en forma gratuita (https://earthexplorer.usgs.gov/). Las fechas empleadas fueron seleccionadas por su representatividad de condiciones ambientales cálidas y húmedas, y por la calidad encontrada en las imágenes disponibles (existencia de pocas obstrucciones).

Como explican Roldán y Poveda (2006), para determinar la densidad de vegetación en un sector, se deben observar los diferentes colores (longitudes de onda) de luz visible (banda roja) e infrarroja reflejada por las plantas. La vegetación saludable absorbe más luz visible de lo que refleja, y refleja una alta porción en luz infrarroja, en cambio, a vegetación no saludable refleja más luz visible y menos infrarroja, es el caso del uso de EVI.

El procesamiento de las imágenes se realizó mediante el software de tratamiento de imágenes satelitales ENVI, con la combinación de bandas explícita en la ecuación 1 (Liu y Huete, 1995):

$$EVI = G\frac{(\rho_{IRc} - \rho_{rojo})}{(\rho_{IRc} + C_1\rho_{rojo} - C_2\rho_{azul} + L)} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

G Factor de ganancia, adoptado como 2.5 en el algoritmo para MODIS.

ρ_{IRc} Reflectancia correspondiente a la banda del infrarrojo cercano.

ρ_{rojo} Reflectancia correspondiente a la banda roja.

ρ_{azul} Reflectancia correspondiente a la banda azul.

C1 y C2 Coeficientes de peso del uso de la banda azul en la corrección del efecto aerosol en la banda roja. Para el algoritmo de MODIS se adoptan C1=6 y C2=7,5, según Liu y Huete, 1995, Jiang et al., 2008.

L Factor de ajuste de efecto del suelo adoptado como 1 en el algoritmo para MODIS.

Según información de SNIA (Storage Networking Industry Association), los valores que adopta el EVI determinan, cuando son 0 o menores, la inexistencia de vegetación. En nuestro caso de estudio, dada la resolución de la imagen y el tamaño de los pixeles, los valores negativos son considerados errores de la imagen por nubosidad, ya que no existen zonas sin vegetación tan grandes dentro de la cuenca.

Los valores del EVI mayores a 0, están asociados a presencia de vegetación, considerando que en los puntos donde el EVI oscila entre 0 y 0,2 la vegetación se encuentra en estrés hídrico o estado crítico. Finalmente, en los puntos donde el EVI varía entre 0,2 y 1 la vegetación se encuentra en estados de estrés hídrico decreciente, siendo el 1 la mejor situación en que se encuentra la cobertura vegetal.

El procedimiento empleado para la cuantificación de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial consistió en la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), por medio del procesamiento geoespacial empleando el software ArcMap, por medio de la ecuación 2.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde A: es la pérdida de suelo por erosión pluvial ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$); R: es el factor que indica la erosión pluvial o erodabilidad del aguacero ($J.cm.m^{-2}.h^{-1}$). K: es el factor de la erodabilidad del suelo ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$); LS el factor que evalúa las pendientes (longitud y gradiente); C: es el factor de ordenación de cultivos; P: es el factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo.

Los resultados de la USLE empleados son los publicados en de Antueno y Gaspari (2021). A partir de estos mapas de USLE, se determinó la erosión potencial máxima en la cuenca del río Ctalamochita, considerando el desgaste potencial máximo que puede presentar un sector, asumiendo las peores condiciones, como ser la inexistencia de cobertura vegetal y la omisión total de prácticas de conservación de suelo. Para su definición se trabajó con imágenes ráster de cada factor, utilizando el software ArcMap, donde se consideraron los términos correspondientes a C (cobertura vegetal) y P (prácticas de cultivo) iguales a la unidad.

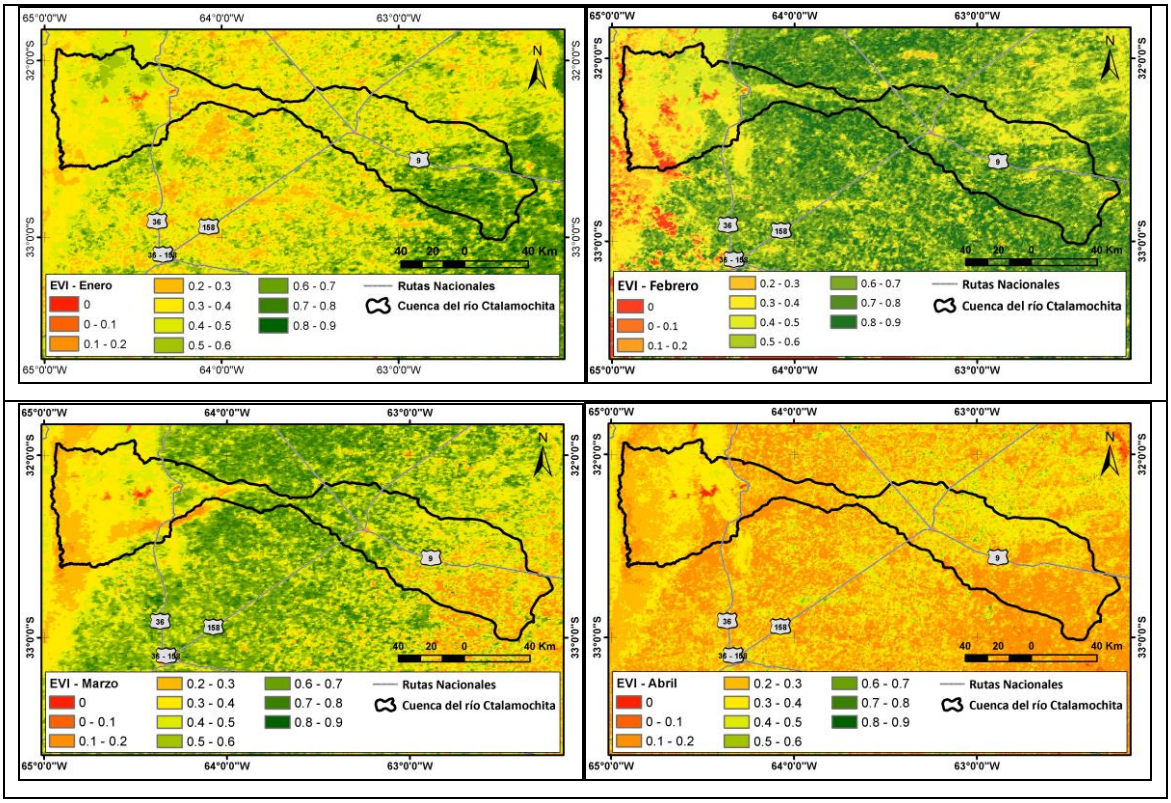
Una vez obtenidos los valores de la distribución mensual de EVI para el año 2014 en la CRC, se reclasificó en rangos para su conformación cartográfica, usando ArcMap. Luego se realizó una tabulación cruzada entre los mapas de EVI y los mapas de erosión hídrica máxima. De esta forma se obtuvo un valor mensual del USLE donde las consideraciones de cobertura, uso de la tierra, y prácticas de conservación de suelos, que

originalmente deberían adoptarse con los parámetros C y P, predefinidos, se determinaron usando el EVI, expresando un carácter mensual al análisis y de variación espacial.

RESULTADOS

Analizando las imágenes mensuales obtenidas de EVI para el año 2014, que se muestran en la Fig. 2, se observa que entre los meses de abril y noviembre los valores de EVI se encuentran, en su mayoría, entre 0 y 0,3, coincidiendo con los meses con menores precipitaciones, permitiendo concluir que la falta de humedad del suelo expone a la vegetación a estados de estrés. A la vez, debe considerarse que la cantidad de vegetación es menor, o su nivel de crecimiento se modifica, debido a que, al inicio del otoño, las plantas cambian su estado vegetativo, entrando en receso y bajan su producción, desprenden sus hojas y ralentizan su crecimiento, hasta que en primavera reinician su crecimiento.

Dada la relación existente entre la capacidad de un suelo de resistir la erosión ante eventos de precipitación, con el tipo y estado de vegetación que lo cubre, puede entenderse la importancia de los datos obtenidos.



 ISBN 978-987-1323-91-3

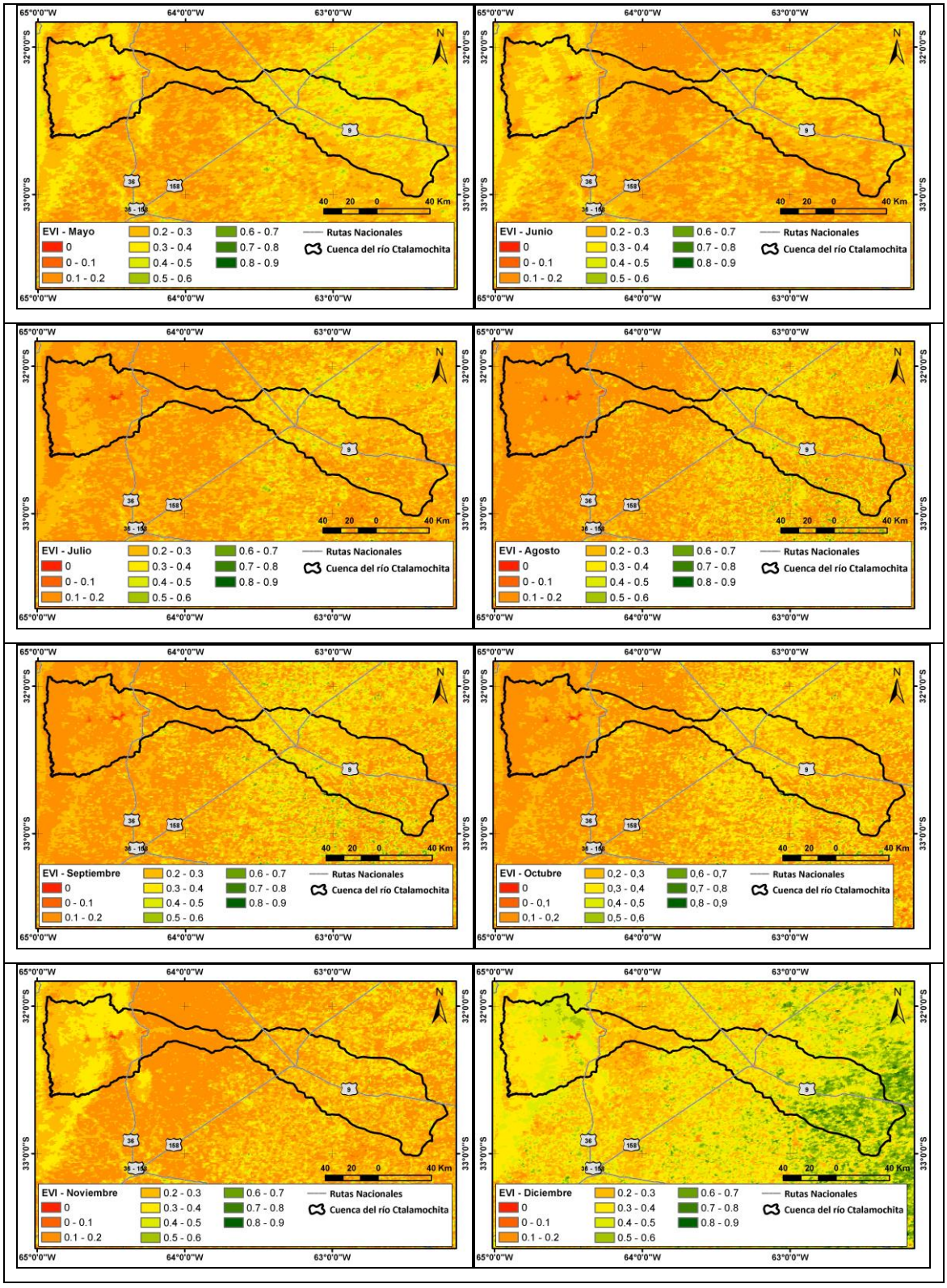


Figura 2. Mapas de EVI mensuales para el año 2014. Fuente: De Antueno, L. 2019.

La Fig. 3 presenta la distribución de la USLE potencial en la CRC reclasificada en cuatro rangos, designados 10, 20, 30 y 40 (unidades). Luego se realizó una tabulación

cruzada de las imágenes obtenidas para cada mes de EVI y la de erosión hídrica máxima.

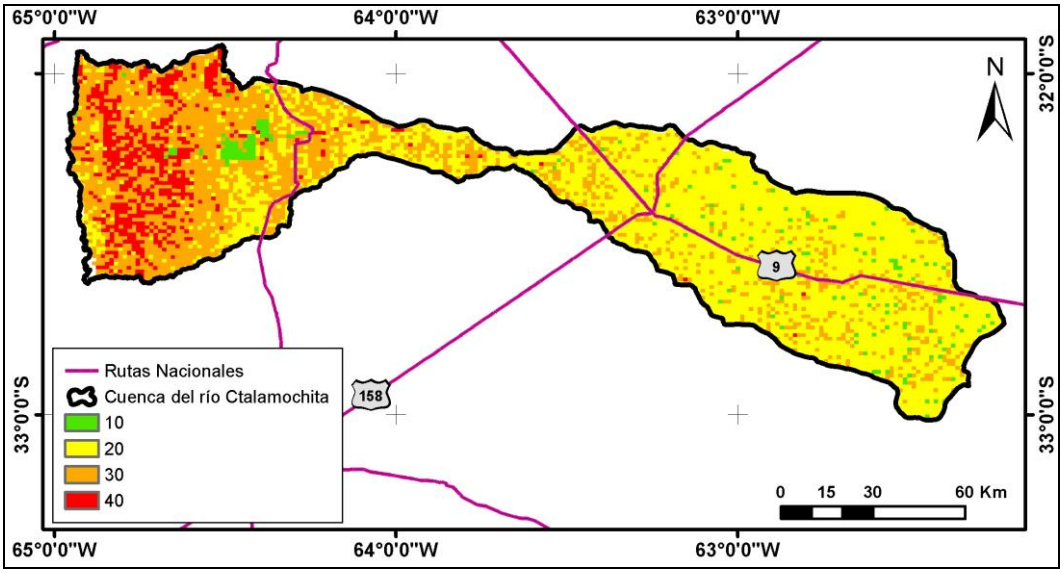


Figura 3. USLE potencial reclasificado. Fuente: de Antueno, 2019.

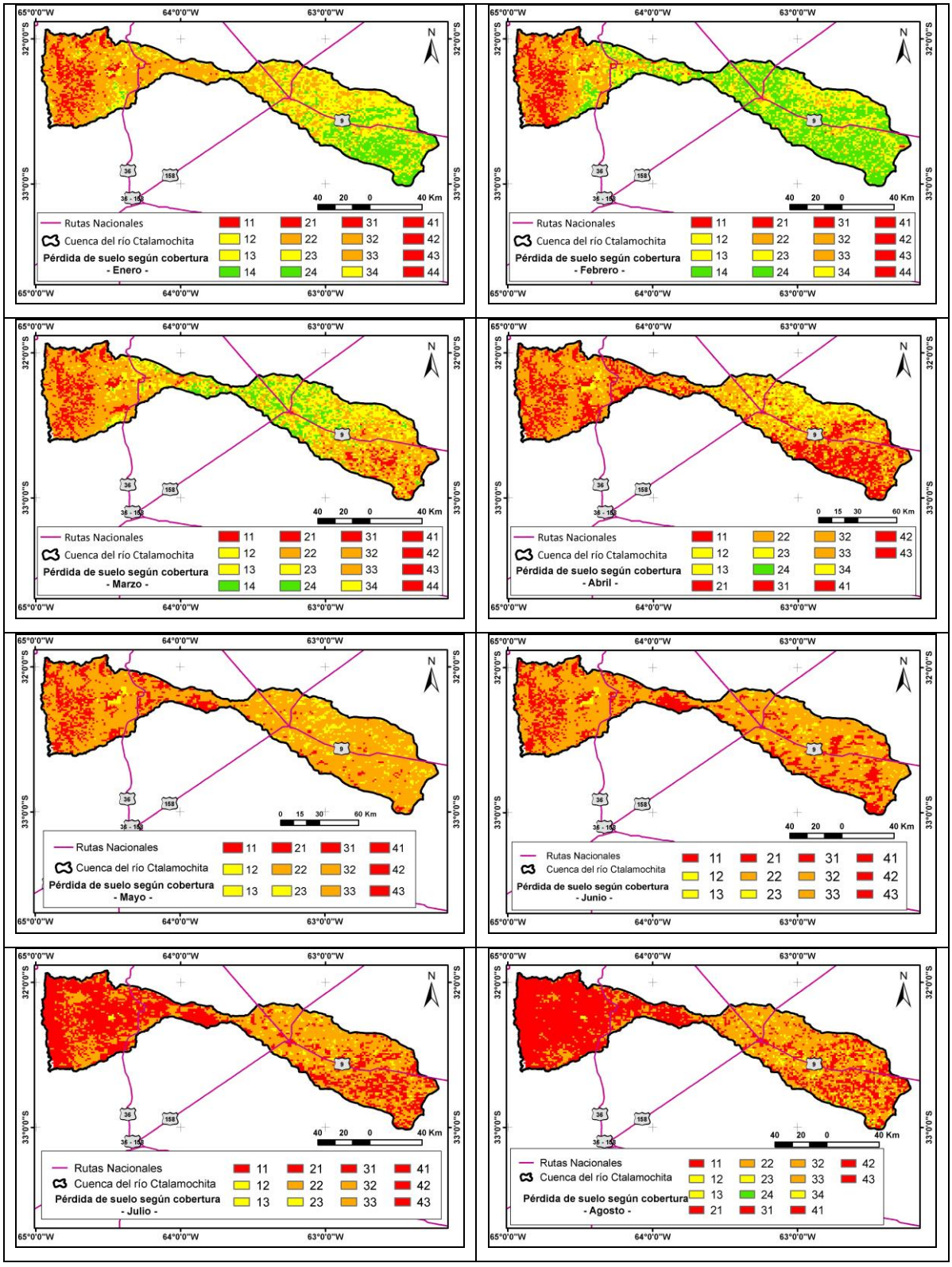
La Tabla I muestra los valores adoptados para dicha tabulación cruzada, donde además de los rangos ya definidos de erosión potencial, se diferenciaron 4 rangos para el EVI, adoptando los valores: 1, 2, 3 y 4.

Tabla I. Rangos para la tabulación cruzada. Fuente: de Antueno, 2019.

EVI			KRLS - Erosión hídrica potencial			
			Nula /leve	Moderada	Alta	Muy Alta
			0 -10	10 - 50	50 - 200	> 200
Estrés hídrico	**Rango**	**Adoptado**	10	20	30	40
Máximo	< 0.2	1	11	21	31	41
Alto	0.2 - 0.4	2	12	22	32	42
Moderado	0.4 - 0.6	3	13	23	33	43
Leve/Nulo	>0.6	4	14	24	34	44

Según la Tabla I, los sectores en color rojo con valores 11, 21, 31 y 41, simbolizan las situaciones con suelo prácticamente desnudo y junto con 42, 43 y 44 representan las peores situaciones con los píxeles en color rojo. En los 43 y 44 la pérdida del suelo es muy alta, si bien hay buena cobertura vegetal del suelo esto no impide su erosión. Las zonas anaranjadas con valores 22, 32 y 33 presentan una erosión hídrica potencial alta. Los valores 12, 13, 23 y 34 (en amarillo) representan los sectores de la cuenca donde la erosión potencial es moderada. Finalmente, los sectores donde la perdida de suelos es nula o leve son los que presentan los valores 14 y 24 (en color verde).

Con el procesamiento geoespacial de la Tabla I, se obtuvieron los mapas presentados en la Fig. 4, donde se analiza la influencia del estado y tipo de la cobertura del suelo y su influencia en la erosión a nivel mensual, de USLE-EVI.


65°0'0"W
64°0'0"W
63°0'0"W
32°0'0"S
33°0'0"S
N
40 20 0 40 Km
Rutas Nacionales
Cuenca del río Ctalamochita
Pérdida de suelo según cobertura
- Enero -
11 21 31 41
12 22 32 42
13 23 33 43
14 24 34 44
- Febrero -
- Marzo -
0 15 30 60 Km
- Abril -
11 22 32 42
12 23 33 43
13 24 34
21 31 41
- Mayo -
- Junio -
- Julio -
- Agosto -

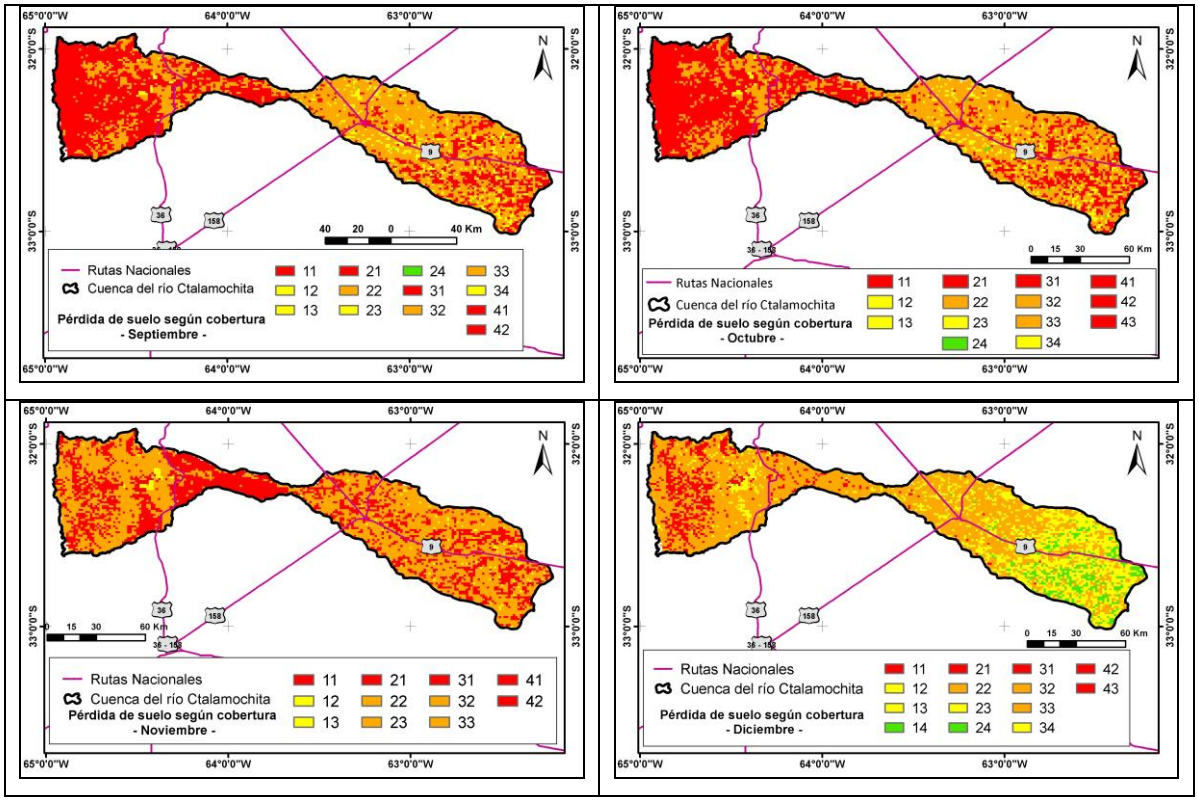


Figura 4. Tabulación cruzada EVI-USLE potencial, mensual, año 2014. Fuente: de Antueno, 2019.

La Tabla II presenta, en porcentaje, la superficie mensual que ocupa cada categoría por color USLE-EVI, que permite analizar la evolución intraanual de la erosión que puede ocurrir en relación al estado de la cobertura.

Tabla II. Superficie mensual ocupada por cada color USLE-EVI (en porcentaje).

Mes	Procentaje de ocupación			
	Rojo	Naranja	Amarillo	Verde
Enero	8,80	43,37	32,14	15,68
Febrero	10,84	25,16	30,42	33,58
Marzo	13,07	50,02	27,35	9,56
Abril	31,89	52,92	15,08	0,11
Mayo	15,64	77,08	7,28	0,00
Junio	24,75	71,37	3,88	0,00
Julio	47,35	49,38	3,27	0,00
Agosto	53,92	40,46	5,37	0,24
Septiembre	45,32	48,16	6,38	0,14
Octubre	41,40	53,86	4,64	0,10
Noviembre	37,41	59,59	2,99	0,00
Diciembre	9,67	59,91	24,68	5,74

En la misma se visualiza que, durante los meses de verano, el porcentaje de sectores en rojo es mucho menor que durante el resto del año, a la vez los sectores en verde ocupan una mayor superficie. Mientras que, la superficie ocupada por sectores en amarillo

disminuye mucho entre mayo y noviembre, comportamiento similar al de la superficie ocupada por el sector verde. Sin embargo, la superficie ocupada por color naranja, exceptuando en el mes de febrero, siempre representa más del 40 % del total de la cuenca.

CONCLUSIONES

Analizando la cartografía generada con la zonificación de EVI se observó que hay una variación estacional, durante los meses de mayores lluvias, de noviembre a abril, donde se alcanzaron los valores máximos del índice.

A partir del análisis conjunto de la erosión potencial y el estado de la vegetación con un paso mensual, representado con el indicador USLE-EVI mensual, se evidencia el comportamiento estacional de la perdida potencial de suelo. Entre los meses de diciembre y marzo, con los valores de EVI más altos, la cuenca presenta una gran cantidad de zonas con nula-leve y moderada erosión hídrica. Mientras que, para los meses de julio a septiembre, cuando el EVI se hace mínimo, casi la totalidad de la cuenca presenta una pérdida de suelos máxima.

REFERENCIAS

De Antueno, L. 2019. Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Ctalamochita. Tesis de maestría. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/78532

De Antueno L. y Gaspari F. 2016. Análisis de la producción de sedimentos por erosión hídrica superficial en la cuenca del río Ctalamochita, Córdoba, Argentina. E-ICES 16. 16° Encuentro Internacional Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. https://icesuncuyo.wixsite.com/e-ices16

Díaz Lozada J., García M., Herrero H., Barchiesi G., Romagnoli M., Portapila M., López F., Castelló E., Cosavella A. y Brarda J. 2015. Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del río Carcarañá. Revista Faculta de Ciencias Exactas. Físicas y Naturales, Vol. 2, No. 1. Pp 59-61.

Ellison, W. D. (1947). Soil Erosion. Soil Sci. Soc. Am Proc., Madison, 12: 479-484

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment, 112, 3833-3845.

Liu, H. Q. y Huete, A. R., 1995. A feedback-based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 33, 457-465.

Roldán, P., Poveda, G. 2006: Variabilidad espacio-temporal de los índices NDVI y EVI. Aplicación a cinco regiones colombianas. Meteorol. Colomb. 10: 47-59. ISSN 0124-6984. Bogotá, D. C. Colombia.

UNVM (Universidad Nacional de Villa María). 2015. Proyecto de gestión integral de Recursos Hídricos, Cuenca río Ctalamochita, provincia de Córdoba. Ed. Tissera G., Cejas G., González A. y Preiato S. 285 pp.

DETERMINACIÓN DE NIVELES DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA. CÓRDOBA. ARGENTINA.

Lucía de Antueno[a] y Fernanda J. Gaspari[a]

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

e-mail: lucia.deantueno@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

La cuenca alta del río Ctalamochita tiene gran potencialidad en la generación de sedimentos dadas las amplias superficies con elevadas pendientes y la morfología que facilita la rápida concentración del agua precipitada. Mientras que, la parte baja, presenta una drástica disminución en las pendientes, asimilando el comportamiento hidrológico a un sistema de llanura, favoreciendo la deposición de sedimentos. El objetivo del trabajo es la determinación de niveles de emisión de sedimentos en toda la cuenca. Para ellos se emplearon modelaciones hidrológicas realizadas utilizando el programa HEC-HMS, variando los eventos de precipitación y los caudales erogados por los seis embalses presentes en la cuenca alta. Se emplearon 4 lluvias: una de 20 mm, valor promedio de las lluvias registradas en los últimos 10 años; otra de 217 mm, siendo esta una precipitación extrema; una lluvia intermedia de 118 mm, determinado como la media aritmética entre las dos anteriores; una lluvia de 75 mm adoptada como nivel de base para la generación de escurrimiento. Una vez logrado el análisis de estos escenarios se determinó la emisión de sedimentos que genera cada evento modelado, empleando la ecuación Modificada de Pérdida del Suelo (MUSLE), que es la extensión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, aplicada cuencas hidrográficas. Finalmente, se discretizaron en niveles de emisión los valores alcanzados. Los resultados obtenidos indican que, para precipitaciones superiores a 100 mm, en la mayor parte de la cuenca se observa un riesgo de emisión moderado/alto. Además, del cálculo de la MUSLE con los caudales determinados para las distintas precipitaciones, se evidencia que el incremento en la generación de sedimentos aumenta con la intensidad de la lluvia, pero no de una forma directamente proporcional, sino que se intensifica cuando los eventos superan los 100 mm.

Palabras Clave: Modelación hidrológica, MUSLE, HEC-HMS

INTRODUCCIÓN

La pérdida de material que se entiende como la erosión del suelo, es la desintegración, desgaste o pérdida de suelo y/o rocas como resultado de la acción del agua y fenómenos de intemperismo. Se entiende a la erosión fluvial es el desgaste que producen las fuerzas hidráulicas de un río en sus márgenes y en el fondo de su cauce, con variados efectos colaterales. Mientras que la erosión de laderas comprende todos los procesos que

ocasionan el desgate y traslado de los materiales de superficie (suelo o roca), por el continuo ataque de agentes erosivos, tales como agua de lluvias, escurrimiento superficial y vientos, que tiende a degradar la superficie del terreno (INDC, 2006).

Según De Antueno y Gaspari (2021), la parte alta de la cuenca del río Ctalamochita (CRC) tiene gran potencialidad en la generación de sedimentos dadas las amplias zonas con elevadas pendientes y la morfología que facilita la rápida concentración del agua precipitada. Mientras que, la parte baja, presenta una drástica disminución en las pendientes, asimilando el comportamiento hidrológico a un sistema de llanura, favoreciendo la deposición de sedimentos. La CARC presenta una superficie de 10.573 km^2 y se encuentra en la zona centro sudeste de la provincia de Córdoba (Fig. 1).

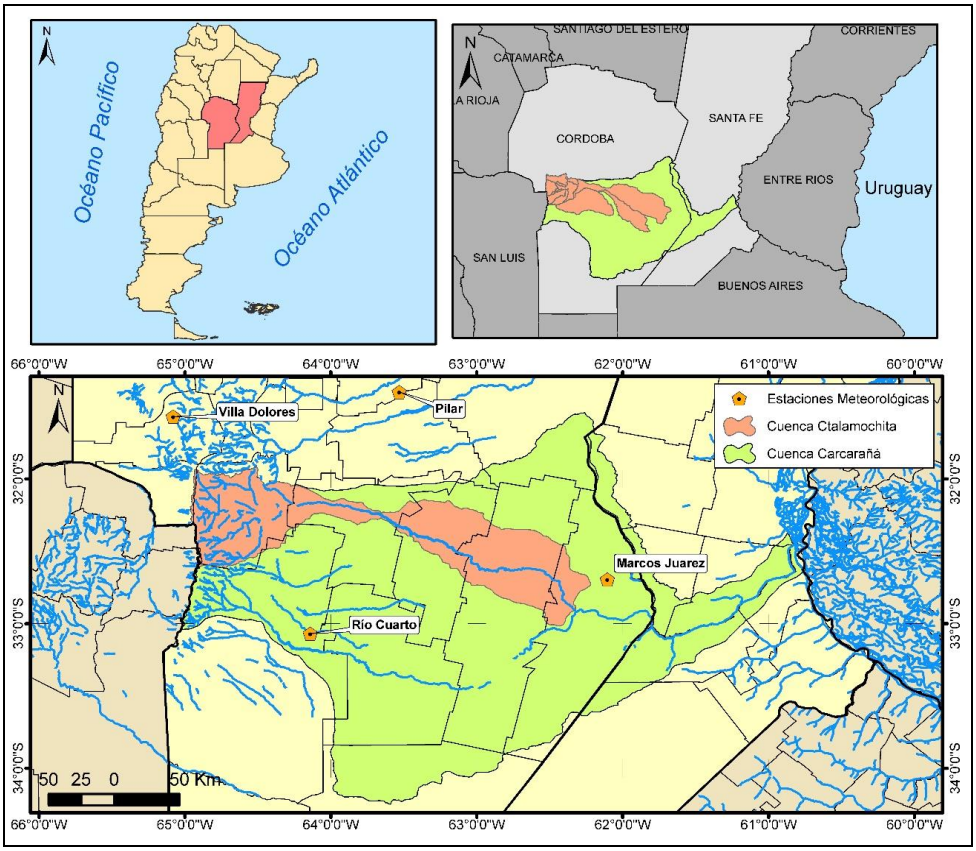


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ctalamochita en la cuenca del río Carcarañá. Fuente: De Antueno, L. 2019.

El objetivo del presente trabajo es la determinación de niveles de emisión de sedimentos en toda la cuenca.

METODOLOGÍA

Para la determinación de niveles de emisión de sedimentos en la CARC se emplearon modelaciones hidrológicas realizadas utilizando el programa HEC-HMS, variando los eventos de precipitación y los caudales erogados por los seis embalses presentes en la cuenca alta. El modelo HEC-HMS 4.2, permite simular el fenómeno lluvia-escorrentía en un sistema hidrológico, y de esta manera obtener datos de caudal y escorrentía para lluvias torrenciales en las diferentes subunidades que componen una cuenca.

Se plantearon cuatro escenarios pluviales para la modelización:

1. Un evento de precipitación mínimo de 20 mm, valor adoptado por ser el promedio de las lluvias registradas en los últimos 10 años, mayores a 2,5 mm;
2. Un evento de precipitación máximo donde se adoptó la lluvia de 217 mm, registrada durante el día 14 de febrero de 2014, que provocó inundaciones y torrentes en la cuenca.
3. Un evento de precipitación intermedio de 118 mm, determinado como la media aritmética entre los dos anteriores;
4. Un evento intermedio de 75 mm adoptado como nivel de base para la generación de escurrimiento.

Según Zimmerman et al. (2000) la variabilidad espacial de los patrones de tormentas es generalmente grande, por ende, una tormenta de diseño estimada a partir de información pluviográfica registrada en una única estación de medición, tiene una validez limitada, desde un punto de vista geográfico. Cuando el área de aplicación es considerable, para lograr que dicha metodología sea representativa en el área de trabajo se emplean frecuentemente las curvas de abatimiento areal de la precipitación. Por ello, en la cuenca Media-Baja de la CARC, dada su gran extensión, se aplicó la ecuación presentada por Zimmerman et al., 2000, para obtener el Coeficiente de Abatimiento Areal (Ecuación 1).

$$CAA = \left[e^{(-0{,}017606*A)}\right]^{\left[0{,}03*d^{(-0{,}2927)}\right]}$$ Ecuación 1.

Siendo,

CAA: Coeficiente de Abatimiento Areal

A: superficie de la cuenca en kilómetros cuadrados.

d: duración de la tormenta en horas.

El modelo HEC-HMS 4.2, diseñado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU (2016), permite calcular los hidrogramas de escurrimiento directo asumiendo la linealización del proceso físico real, esto es, utilizando la técnica del hidrograma unitario. El modelo requiere datos de entrada para el análisis como la distribución espacial de las subcuencas, ríos, uniones y sumideros. También son necesarios los datos de lluvia, para cada sector analizado.

En la modelización hidrológica de la cuenca del río Ctalamochita, con el HEC-HMS 4.2 se aplicó el método de Número de Curva para transformar la lluvia en escorrentía, a nivel de subcuenca. Además, se empleó el método del Hidrograma Unitario para la transformación de la escorrentía en hidrograma, por lo que fueron requeridos los valores del tiempo de retraso de cada cuenca. Según Gaspari et al. (2013) el hidrograma unitario de una cuenca es definido como el hidrograma resultante de una precipitación efectiva de 1 mm de altura, distribuida uniformemente en la cuenca, de intensidad constante y de duración unitaria. Esta definición permite aplicar el método del hidrograma unitario para obtener hidrogramas individuales parciales desplazados en el tiempo, por el método denominado deconvolución, a partir del hidrograma total de escurrimiento directo de la cuenca para una precipitación dada de duración conocida.

Además, el HEC-HMS emplea el método Muskingum-Cunge para modelizar el traslado de caudales por el cauce, requiriendo datos como: la longitud y pendiente de cada cauce, el número de Manning del lecho y el tipo de sección de cada río.

En cuanto al esquema de modelación, se planteó la simulación individual de cada una de las subcuencas definidas, asumiendo un tiempo de retardo que representa el 60 % del tiempo de concentración promedio calculado. Se emplearon las secciones de los cauces cuyas medidas fueron determinadas durante la realización de los aforos, registradas por la UNVM, en febrero de 2015, considerando secciones de ocho puntos cada una.

Para estimar el volumen de sedimentos emitido ante un evento de precipitación (Y), se aplicó el modelo MUSLE, que reemplaza sólo el factor R de USLE, por un término que tiene en cuenta el efecto del flujo de escurrimiento en el proceso erosivo de la tormenta analizada (Ecuación 2).

$$Y = 11{,}8\,(Q - q)^{0.56} K.LS.C.P \qquad \text{Ecuación 2}$$

Siendo Q el volumen total escurrido (en m^3) y q el caudal pico (en $m^3.s^{-1}$), ambos datos obtenidos a partir de la modelización hidrológica con HEC-HMS.

Se utilizaron los resultados de la zonificación geoespacial de la USLE publicados en De Antueno y Gaspari (2021) para el procesamiento del resto de los factores.

RESULTADOS

Se trabajó a nivel de subcuenca, siendo un total de 15, correspondientes a los principales cursos afluentes a los seis embalses existentes en la parte alta de la CRC y también las llamadas zonas de aporte que, si bien no presentan cauces definidos o permanentes, también aportan superficial o subterráneamente a dichos embalses. La parte media y baja de la cuenca (unificadas y denominadas CB), se analizó de forma conjunta, Fig. 2.

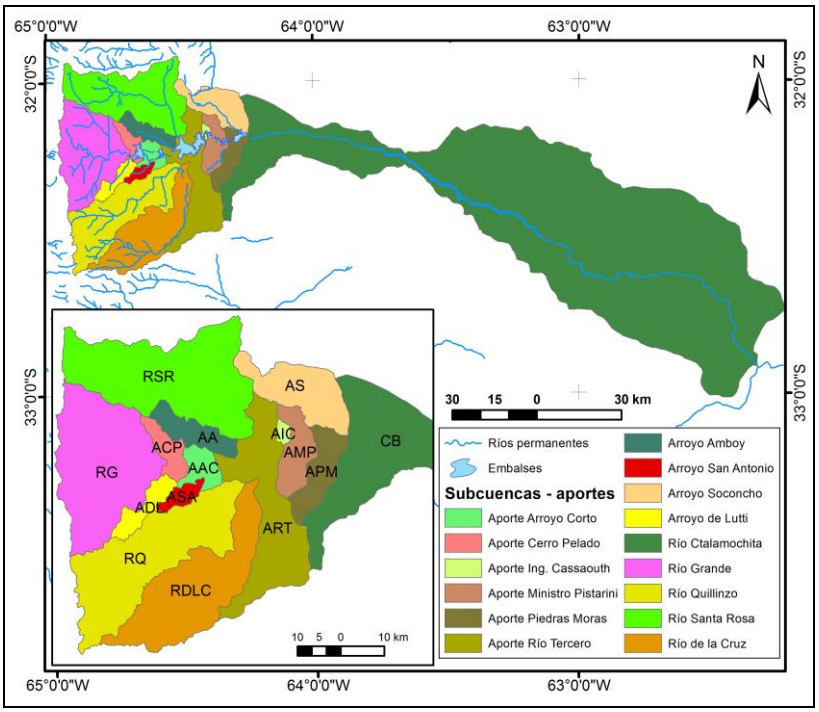


Figura 2. Subcuencas y zonas de aporte a los embalses. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Los eventos de precipitación empleados en las distintas modelaciones hidrológicas de la cuenca Alta de la CRC, se presentan en la Fig. 3.

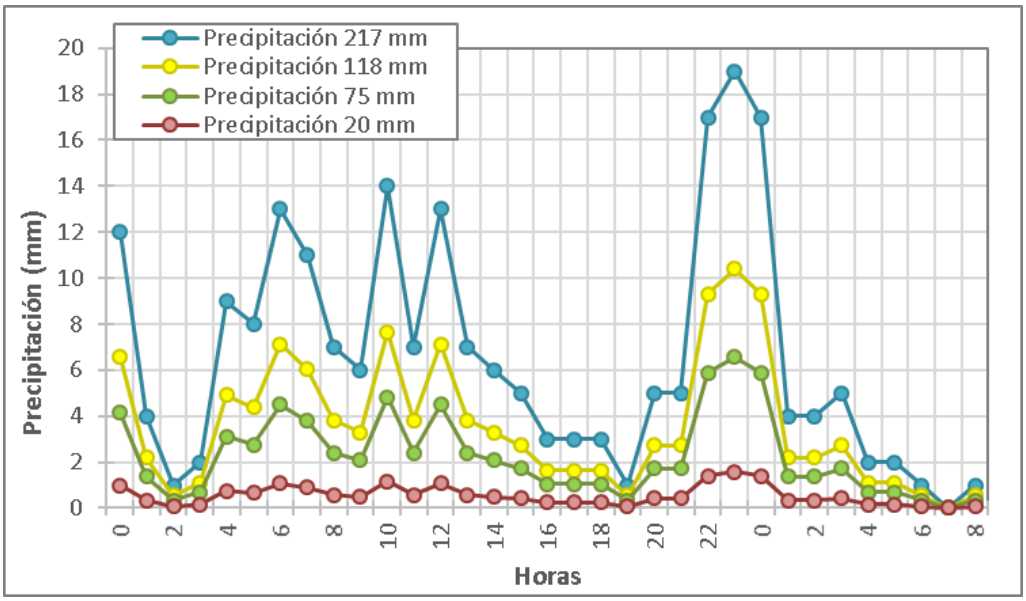


Figura 3. Eventos aplicados en las modelaciones hidrológicas de la cuenca Alta. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Dada la gran extensión de la cuenca Media-Baja, se analizó divida en tres grandes subcuencas, a las que se les aplicaron, en los cuatro eventos de precipitación descritos, un Coeficiente de Abatimiento Areal (CAA) calculado de 0,634. Los valores empleados en las distintas modelaciones de la cuenca Media-Baja se presentan en la Fig. 4.

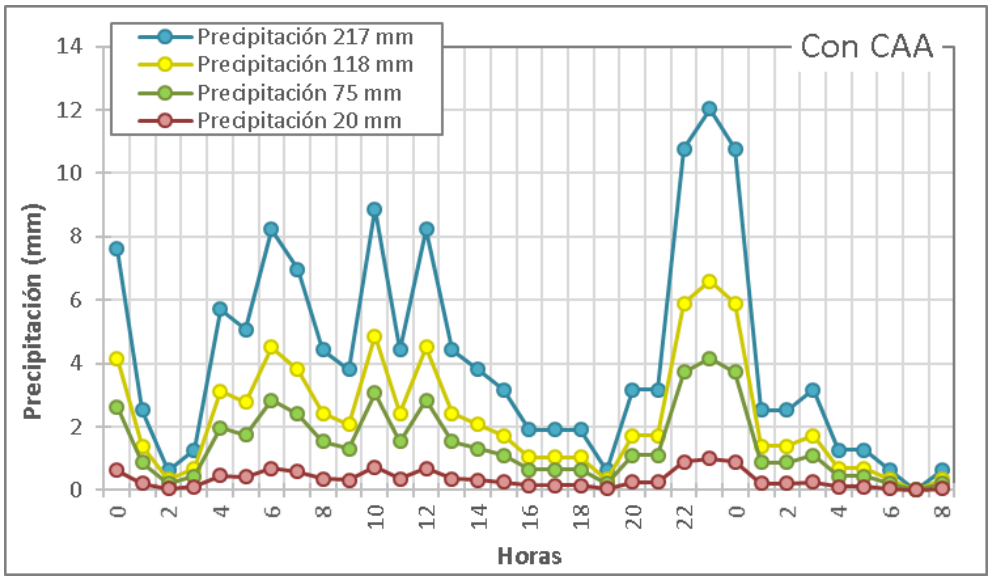


Figura 4. Eventos aplicados en las modelaciones de la cuenca Media-Baja, con CAA. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Los Números de Curva presentados en la Fig. 5 fueron determinados a partir del mapa de aptitud edáfico – vegetal, realizado por medio de una tabulación cruzada entre el

mapa de Grupos Hidrológicos (GH) (INTA 1:50.000) y el mapa de uso de suelo obtenido por De Antueno y Gaspari (2021).

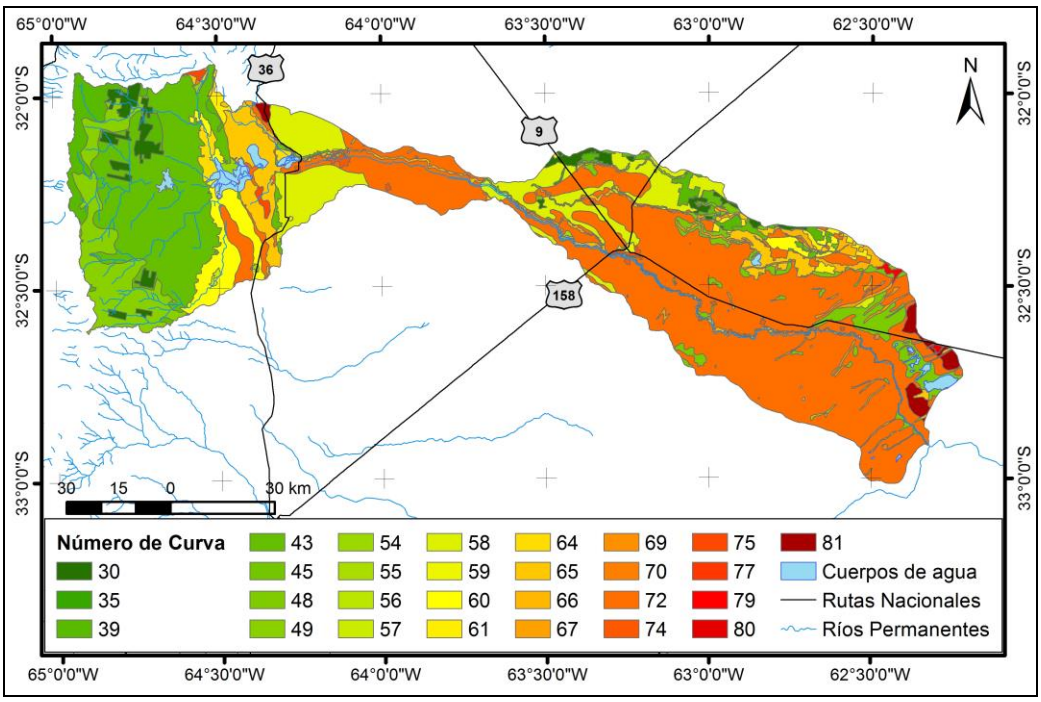


Figura 5. Números de curva en la cuenca. Fuente: De Antueno, L. 2019.

A partir de estos datos, empleando el software ArcGis 10.1, se realizó el cálculo del número de curva ponderado según la superficie ocupada de cada subcuenca y sector de aporte. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla I.

Tabla I. Números de curva ponderados por subcuenca y zona de aporte.

Subcuenca / Zona de aporte a embalses	Superficie		Curva Número
	km2	ha	
Río Santa Rosa	715,7	71.573,5	43,8
Río Grande	637,4	63.739,5	43,3
Río Quillinzo	615,8	61.575,3	45,3
Río De La Cruz	517,7	51.769,0	48,9
Arroyo Soconcho	243,7	24.374,2	62,7
Arroyo De Lutti	74,1	7.413,5	43,3
Arroyo San Antonio	37,9	3.792,6	43,0
Arroyo Amboy	107,0	10.700,8	43,7
Cuenca media-baja	6749,0	674.904,7	66,7
Arroyo Corto	67,5	6.754,1	42,4
Rio Tercero	460,1	46.007,6	53,1
Cerro Pelado	71,0	7.102,7	40,1
Piedras Moras	135,8	13.579,8	56,8
Ing. Reolín	125,6	12.563,6	57,4
Ing. Cassafousth	14,9	1.487,9	42,4

Dada la gran extensión de las cuencas estudiadas y la existencia de una gran cantidad de cauces, con sus respectivos afluentes, especialmente en la parte alta, el coeficiente de

rugosidad de Manning (n) fue adoptado similar para todos los cauces con un valor medio de 0,03, en función de las observaciones realizadas en los distintos viajes consumados a la cuenca.

Los resultados obtenidos en la modelación de cada uno de los 4 escenarios para toda la CRC, se presentan en la Tabla II. Se evidencian caudales extremadamente elevados en la modelación con la lluvia de 217 mm, disminuyendo de forma abrupta a medida que la precipitación disminuye, haciéndose nulos para los escenarios con precipitación menor a 75 mm.

Tabla II. Resultados obtenidos con HEC-HMS en las cuatro modelaciones.

Sector estudiado	Superficie (ha)	Modelación - 217mm		Modelación - 118 mm		Modelación - 75 mm		Modelación - 20 mm	
		Volumen (1000 m^3)	Caudal Punta (m^3/s)	Volumen (1000 m^3)	Caudal Punta (m^3/s)	Volumen (1000 m^3)	Caudal Punta (m^3/s)	Volumen (1000 m^3)	Caudal Punta (m^3/s)
Subcuenca del Río Santa Rosa	71573,50	29858,69	667,77	4183,19	111,84	62,81	1,82	0,00	0,00
Subcuenca del Río Grande	63739,50	25946,66	677,67	3369,65	109,8	26,21	1,04	0,00	0,00
Subcuenca del Río Quillinzo	61575,30	28212,84	608,86	4453,32	115,5	1492,54	39,29	0,00	0,00
Subcuenca del Río De La Cruz	51769,00	28622,09	584,85	5572,77	136,39	576,56	14,94	0,00	0,00
Subcuenca del Arroyo Soconcho	24374,20	22517,13	489,62	6878,15	175,91	2030,97	60,29	0,00	0,00
Subcuenca Arroyo De Lutti	7413,50	3017,61	110,71	408,89	17,68	4,12	0,2	0,00	0,00
Subcuenca Arroyo San Antonio	3792,60	1515,29	59,40	200,06	9,86	1,37	0,07	0,00	0,00
Subcuenca Arroyo Amboy	10700,80	4473,41	144,91	616,56	24,68	8,46	0,37	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Arroyo Corto	674904,70	2596,45	98,16	324,49	14,35	0,66	0,03	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Río Tercero	6754,10	30683,51	631,41	7150,73	175,85	1240,57	34,22	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Cerro Pelado	46007,60	1008,79	37,14	0,97	0,04	0,000	0,000	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Piedras Moras	7102,70	10453,46	246,07	2755,02	77,99	625,21	20,46	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Ing. Reolín	13579,80	9883,17	290,39	2651,26	93,01	622,83	24,98	0,00	0,00
Zona de aporte Emb. Cassafousth	12563,60	572,03	24,76	71,49	3,70	0,15	0,01	0,00	0,00
Cuenca media-baja	674810,00	329939,2	2684,0	83116,4	636,3	17039,7	94,1	0,0	0,0

La Fig. 6 muestra la forma en que los caudales pico aumentan a medida que se incrementan las precipitaciones, exponiendo el grado de respuesta de cada zona estudiada, el cual se acentúa para eventos de precipitación mayores a los 100 mm. Los resultados para la cuenca media-baja no fueron graficados debido a la disparidad en las escalas, dado que el caudal obtenido en ese caso es mucho mayor.

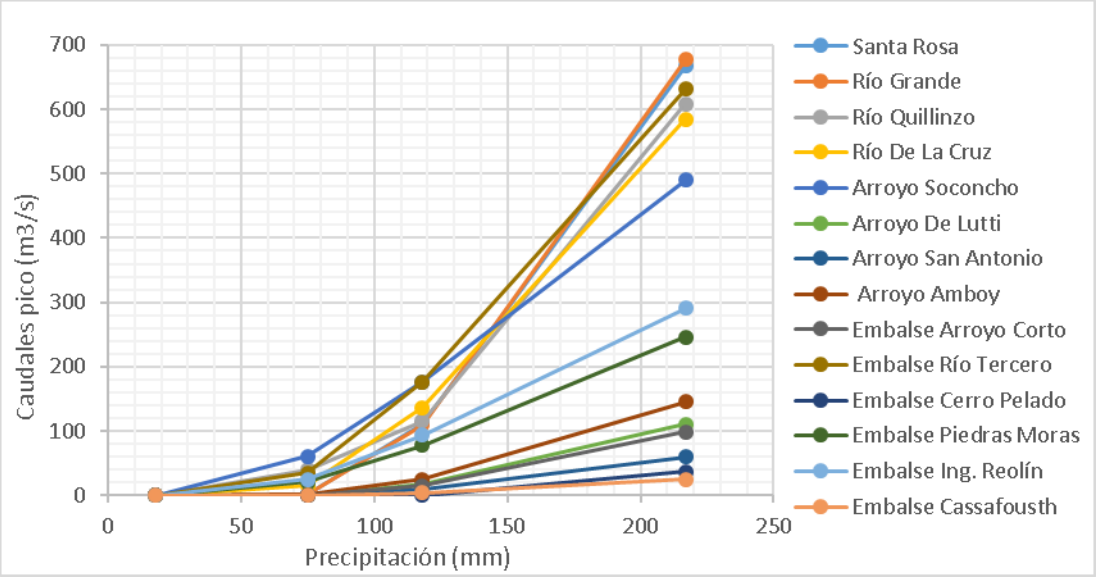


Figura 6. Caudales pico vs eventos de precipitación en la cuenca alta de la CRC Fuente: De Antueno, L. 2019.

 ISBN 978-987-1323-91-3

Con los caudales obtenidos en las modelaciones y los volúmenes de agua generados se determinó la cantidad de sedimentos que se producen en cada caso.

Los resultados obtenidos, en las modelaciones se analizaron por separado: por un lado, las toneladas de suelos erosionado por hectárea, es decir por unidad territorial en la Tabla III y por el otro las toneladas de suelo que genera cada evento de precipitación en la Tabla IV en las distintas subcuencas y sectores estudiados.

Las gradaciones de MUSLE fueron determinadas mediante percentiles indicando el riesgo hídrico ante eventos pluviales representado en las Tablas III y IV, donde:

- En verde se observan los valores mínimos de erosión, cuando el nivel de generación de sedimento es menor, para ambas tablas el valor mínimo determinado es 0.
- En rojo se identificaron los valores máximos de erosión, cuando el nivel de generación de sedimentos es mayor, siendo el máximo de 1,246 $Mg.ha^{-1}$ en la primera tabla, correspondiente al sector de aporte al embalse Río Tercero y 14.242,5 Mg en la segunda, correspondiente a la subcuenca del río Quillinzo.

Tabla III. MUSLE por hectárea para cada cuenca y para cada modelación.

Sector estudiado	MUSLE ($Mg.ha^{-1}$)			
	217 mm	118 mm	75 mm	18 mm
Subcuenca del Río Santa Rosa	0,151	0,050	0,005	0,000
Subcuenca del Río Grande	0,168	0,054	0,004	0,000
Subcuenca del Río Quillinzo	0,231	0,082	0,045	0,000
Subcuenca del Río De La Cruz	0,208	0,083	0,023	0,000
Subcuenca del Arroyo Soconcho	0,237	0,122	0,062	0,000
Subcuenca Arroyo De Lutti	0,386	0,126	0,010	0,000
Subcuenca Arroyo San Antonio	0,467	0,150	0,009	0,000
Subcuenca Arroyo Amboy	0,241	0,079	0,007	0,000
Zona de aporte Emb. Arroyo Corto	0,005	0,001	0,000	0,000
Zona de aporte Emb. Río Tercero	1,246	0,551	0,207	0,000
Zona de aporte Emb. Cerro Pelado	0,084	0,002	0,000	0,000
Zona de aporte Emb. Piedras Moras	0,570	0,270	0,118	0,000
Zona de aporte Emb. Ing. Reolín	0,079	0,038	0,017	0,000
Zona de aporte Emb. Cassafousth	0,027	0,009	0,000	0,000
Cuenca Media-Baja	0,018	0,008	0,003	0,000

Tabla IV. MUSLE para cada cuenca y para cada modelación.

Sector estudiado	Superficie	MUSLE - Mg			
	ha	217 mm	118 mm	75 mm	18 mm
Subcuenca del Río Santa Rosa	71.573,5	10.784,0	3.587,4	341,7	0,0
Subcuenca del Río Grande	63.739,5	10.702,3	3.412,2	224,9	0,0
Subcuenca del Río Quillinzo	61.575,3	14.242,5	5.065,2	2.746,2	0,0
Subcuenca del Río De La Cruz	51.769,0	10.758,6	4.303,3	1.208,0	0,0
Subcuenca del Arroyo Soconcho	24.374,2	5.767,2	2.968,6	1.499,2	0,0
Subcuenca Arroyo De Lutti	7.413,5	2.865,0	935,4	71,3	0,0
Subcuenca Arroyo San Antonio	3.792,6	1.772,0	570,2	35,0	0,0
Subcuenca Arroyo Amboy	10.700,8	2.576,9	849,4	76,9	0,0
Zona de aporte Emb. Arroyo Corto	6.754,1	3.058,9	954,5	29,7	0,0
Zona de aporte Emb. Río Tercero	46.007,6	8.416,8	3.723,2	1.396,1	0,0
Zona de aporte Emb. Cerro Pelado	7.102,7	3.886,1	79,4	0,0	0,0
Zona de aporte Emb. Piedras Moras	13.579,8	4.048,6	1.918,6	836,2	0,0
Zona de aporte Emb. Ing. Reolín	12.563,6	1.068,4	511,4	227,2	0,0
Zona de aporte Emb. Cassafousth	1.487,9	343,9	107,3	3,4	0,0
Cuenca Media-Baja	674.904,7	12.341,0	5.702,3	2.347,7	0,0

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que, para precipitaciones mayores a los 100 mm aproximadamente, en la mayoría de las cuencas se observa un nivel de generación de sedimentos moderado/alto. Especialmente en la Tabla III, donde para precipitaciones mayores a 200 mm la cantidad de sedimentos generados por erosión hídrica superficial se vuelve muy alta.

Sin embargo, cuando se analiza cada subcuenca, Tabla IV, se visualiza que en la cantidad total de sedimento que se genera en cada cuenca, los valores obtenidos son relativos al tamaño de cada subcuenca estudiada.

CONCLUSIONES

Analizando los resultados se evidencia que el incremento en la generación de sedimentos depende del aumento en la intensidad de la lluvia, incluso esto se intensifica cuando los eventos superan los 118 mm, esto se ha observado en todas las subcuencas estudiadas.

Para las modelaciones con el evento de 118 mm, los caudales sólidos obtenidos son menores, con respecto a los anteriores, evidenciando que pueden producir inundaciones y desbordes en la parte baja de la cuenca y arrastre de material.

En el caso de las modelaciones realizadas con el evento de 75 mm, los caudales escurridos y el arrastre de sedimentos es mucho menor, en toda la cuenca, incluso hay sectores donde no se produce erosión hídrica, con valores de toneladas por hectárea próximos a cero.

Analizando comparativamente los resultados obtenidos del cálculo de la MUSLE con los caudales determinados con las distintas modelaciones, se hallaron valores de precipitación a partir de los cuales puede observarse el incremento en la generación de sedimentos. Ese incremento depende de la intensidad de la lluvia, pero no de una forma directamente proporcional, sino que se intensifica cuando los eventos superan los 100 mm, lo cual fue observado en todas las subcuencas estudiadas.

REFERENCIAS

De Antueno, L. 2019. Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Ctalamochita. Tesis de maestría. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/78532

De Antueno L. y Gaspari F. 2016. Análisis de la producción de sedimentos por erosión hídrica superficial en la cuenca del río Ctalamochita, Córdoba, Argentina. E-ICES 16. 16° Encuentro Internacional Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. https://icesuncuyo.wixsite.com/e-ices16

INDC (Instituto Nacional de Defensa Civil). 2006. Manual Básico para la Estimación del riesgo, Dirección Provincial de prevención (DINAPRE) Unidad de Estudios y Evaluación de Riesgos (UEER), Lima, Perú. Ed. Bisbal Sanz, A., Picón Gonzáles, A. Casaverde Río, M., Jáuregui Laveriano, F., Anchayhua Altamirano R., Sánchez Vidalón, R., Masana García, M. Pp 73.

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez Vagaría, A., Besteiro, S. 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. EDULP, Universidad Nacional de La Plata, 2013. Pp 191.

Zimmermann, E., Riccardi, G., Pieroni, H., Arraigada, M. 2000. Curvas de abatimiento areal de tormentas región Pampa Ondulada (Santa Fe, Argentina). CUADERNOS del CURIHAM, Vol. 6. Pp 1,7.

ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE UN PESTICIDA

José A. Gálvez, José A. Cantero, Lucas A. Caride, Pablo Salomón, Cecilia López, Sergio A. Vardaro

Bioprocesos, Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA

e-mail: jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

El uso de pesticidas en la agricultura es un hecho cotidiano a pesar de los intentos de realizar agricultura verde. En este trabajo se analizó la posible incidencia de un vertido accidental de un fungicida de amplio espectro denominado tebuconazol mediante un estudio de riesgo basado en un software que modela la incidencia de una substancia en base a concentración, vías de migración y posibles receptores. Este derrame ficticio se modeló en un entorno agrícola propio del norte de Mendoza, con afectación de suelo y acuífero superficial y una concentración similar al límite de solubilidad en agua. Este estudio indicó una alta capacidad de migración del compuesto hacia los acuíferos someros, una volatilidad baja y demostró toxicidad para seres humanos considerando consumo de agua afectada. En base a ello se realizó un estudio para definir la alternativa de biodegradar el tebuconazol mediante un consorcio microbiano degradador de hidrocarburos. El consorcio se extrajo de una biopila de suelos empetrolados en proceso de biorremediación. Los microorganismos recuperados se utilizaron para degradar una suspensión de tebuconazol con una concentración de 2 g/l. Los resultados preliminares indican que el compuesto es biodegradable y eliminando los efectos abióticos en el proceso (del orden del 6 %), se llegó a una degradación del orden de 50 % en un periodo de 5 días. En ensayos de mayor duración se obtuvieron similares resultados.

Palabras Clave: Biodegradación, Tebuconazol, Riesgo

INTRODUCCIÓN

El uso de pesticidas en la agricultura es un hecho cotidiano a pesar de los intentos de realizar agricultura verde. En este trabajo se analizó la posible incidencia de un vertido accidental ficticio de un fungicida de amplio espectro denominado tebuconazol mediante un estudio de riesgo. En base al resultado del estudio de riesgo se realizó un ensayo para definir la alternativa de biodegradar el tebuconazol mediante un consorcio microbiano degradador de hidrocarburos.

CARACTERISTICAS QUIMICAS Y TOXICOLÓGICAS DEL TEBUCONAZOL

El compuesto conocido comercialmente como Tebuconazol químicamente se denomina (RS)- 1-(4-Chlorophenyl)- 4,4-dimethyl-3-(1H, 1,2,4-triazol-1-ylmethyl) pentano- 3-ol. Su fórmula condensada es $C_{16}H_{22}ClN_3O$ y la estructura molecular simplificada está graficado en la Fig. 1. La función del tebuconazol es inhibir la biosíntesis de esteroles grupo 3 (Essence, López, Nufarm)

 ISBN 978-987-1323-91-3

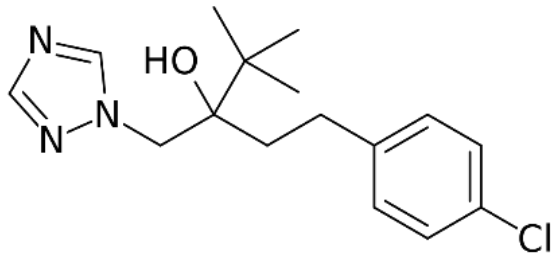


Figura 1. Estructura molecular simplificada del tebuconazol (los extremos de los enlaces C-C son grupos CH_2)

Usos: Fungicida sistémico, de acción preventiva, curativa y erradicante. Inhibe la biosíntesis del ergosterol del hongo. Posee un amplio espectro de acción destacándose en el control de enfermedades en trigo y otros cereales, como fusariosis, septoriosis, royas y oidios, aumentando el rendimiento y calidad de la cosecha, frutales como durazneros, manzanos y ornamentales para la producción de flores. (Essence, Nufarm)

Toxicidad: según la información de seguridad proporcionada por los fabricantes y basados en datos toxicológicos actuales y niveles de exposición previstos para los cultivos, no se espera que el tebuconazol represente un riesgo agudo significativo para peces, invertebrados acuáticos, plantas acuáticas, aves y pequeños mamíferos. Sin embargo, existe la posibilidad de que exista un riesgo crónico de peces de agua dulce, peces marinos e invertebrados marinos de usos propuestos en césped. Aunque no se predice un riesgo agudo para las aves, existe un riesgo crónico potencial para las aves que se alimentan principalmente de vegetación (pasto y follaje cortos y altos) o de insectos resultantes de todos ellos. (Essence, López, Nufarm)

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos está calificado como un posible cancerígeno y está listado como categoría C dentro de estas sustancias. Según la OMS está catalogado como categoría III en grado de toxicidad. (López)

En base a su tiempo de vida media de 800 días, y su K_{oc}= 906 a 1251 ml/g es probable que se adhiera a partículas del suelo y puede moverse desde el sitio de aplicación sobre sedimentos arrastrados en aguas de escorrentía. (Essence, López, Nufarm)

ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL RIESGO (ACR)

Es un proceso sistemático, cualitativo y cuantitativo, que se lleva a cabo para caracterizar la naturaleza y magnitud de los riesgos potenciales para la salud humana y el ambiente, a consecuencia de la exposición a sustancias peligrosas, contaminantes o agentes liberados de sitios que contienen residuos peligrosos. En base a esta evaluación se define si el sitio requiere tratamiento inmediato, a corto plazo (2 años), a largo plazo (más de 2 años) o no requiere tratamiento (ASTM).

Esta herramienta consiste básicamente en la modelización del comportamiento de la contaminación, evaluando su movilidad sobre los medios que se considere de acuerdo al caso, con el fin de determinar las concentraciones a las que estarán expuestas las personas relacionadas con el sitio evaluado. Tras calcular estas concentraciones se determinan las dosis de exposición que junto al análisis de toxicidad, se utilizan para

determinar los valores residuales admisibles o Site Specific Target Levels (SSTLs) de cada contaminante

El proceso de análisis consta de tres fases que se relacionan entre sí. Se inicia con el análisis de la toxicidad del contaminante, posteriormente la migración del mismo luego el análisis de la exposición y finalmente se resumen y combinan estos resultados con el fin de estimar el riesgo derivado de la exposición.

La primera fase corresponde a la caracterización de los contaminantes y del sitio afectado. La segunda fase define y caracteriza las vías de migración del contaminante (por ejemplo lixiviación, evaporación, arrastre de polvos, transporte a través de agua subterránea, etc). La tercera fase define y caracteriza los receptores potenciales (personas) y los clasifica en tres grandes grupos: receptor residencial, receptor industrial, receptor comercial y además distingue por franja etaria (niño, adolescente y adulto).

Para llevar a cabo el análisis de riesgo se definen tres niveles crecientes en complejidad:

Nivel 1 (TIER 1): Se utilizan los valores medios obtenidos del monitoreo del contaminante y los consideran según su concentración o bien por su grado de peligrosidad. No es específico del sitio.

Nivel 2 (TIER 2): Se utilizan parámetros específicos del sitio. Se monitorean y analizan todos los contaminantes a lo largo de todas las vías de exposición.

Nivel 3 (TIER 3): Este Nivel incluye el desarrollo de modelos matemáticos específicos para el sitio.

Los Nivel Base de Referencia (RBLs) para suelos se calculan según el tipo de exposición de que se trate. Esto es exposición directa con el contaminante o cuando es indirecta.

Exposición Directa: Según las características particulares del contaminante, la vía más significativa de exposición a tener en cuenta es el punto de contacto o de exposición de la población humana con el agente químico, es decir la fuente de contaminación en sí misma.

Exposición Indirecta: La posibilidad de una exposición indirecta con el agente químico, se evalúa de acuerdo a las condiciones del agente químico, a las características del suelo, a las vías de exposición, a las condiciones climáticas y de la población humana potencialmente expuesta.

El Análisis Cuantitativo de Riesgo es la herramienta adecuada para determinar las concentraciones de contaminantes que garantizan la ausencia de riesgos en cada caso concreto (en la terminología inglesa, que es frecuentemente utilizada, estas concentraciones se denominan Site Specific Target Levels o SSTLs).

CRITERIO DE EVALUACIÓN

La metodología de la evaluación calcula la concentración máxima admisible de un compuesto a partir de la cual existe riesgo carcinogénico o tóxico conocido como SSTL (ASTM) Estos niveles se indican en la Tabla I.

Tabla I. Concentraciones objetivo específicas de sitio (SSTL)

Valores aceptables de riesgo para la salud	**Individual**	**Acumulativo**
Riesgo aceptable para compuestos cancerígenos	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Cociente de riesgo aceptable	1	1

Este criterio indica que hay riesgo cuando se alcanza la probabilidad de que una persona contraiga cáncer en su vida en una población de 100000 individuos. Para este criterio se utiliza la recomendación de la Organización Mundial de la Salud en la que se indica que se considera riesgosa una substancia cuando la probabilidad de contraer cáncer pasa de 10^{-6} a 10^{-5}, es decir que 1 persona en cien mil puede contraer cáncer (ASTM).

El coeficiente de riesgo aceptable para componentes tóxicos es la relación entre la concentración de compuesto que recibe la persona y la concentración máxima a la que puede estar expuesta sin tener efectos en la salud. En base a esta definición cuando se supera la unidad existe riesgo toxicológico ya que la concentración supera el límite máximo tolerable (ASTM).

Teniendo en cuenta la toxicidad moderada del mismo se hizo un estudio del riesgo que implicaría un vertido en suelo y luego lixiviación al agua subterránea. Para ello se utilizó el soft: RBCA Tool Kit For Chemical Release, versión 2.6, que para el cálculo de riesgo utiliza las recomendaciones de la norma ASTM E1739 para escenarios definidos y ambos tipos matrices (suelo y agua). Las rutas de exposición consideradas fueron subsuelo y aguas subterráneas afectados y transporte de agua subterránea. Como resultado de este estudio se determinó toxicidad para la ingesta de agua subterránea (Tablas II y III).

Tabla II. Rutas de exposición consideradas

Vías de exposición	Ubicación en el sitio		Ubicación fuera del sitio	
	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia
Ingesta de agua subterránea	Residencial	Sí	Agricultor	Sí

Tabla III. Riesgo resultante para el escenario propuesto

Vía de exposición	**Riesgo Derrame**	
	Carcinogénico	Tóxico
Ingesta de agua subterránea	NO	SI

 ISBN 978-987-1323-91-3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como la vida media es muy alta (800 días) se planteó un estudio de biodegradabilidad. Para ello se utilizó un consorcio microbiano activo proveniente de una biopila en donde se realiza la degradación de hidrocarburos por parte de estos microorganismos. (Ercoli et al 2001). Los mismos son microorganismos naturales presentes en los suelos empetrolados que adecuadamente estimulados con nutrientes, agua y aireación producen la degradación del hidrocarburo a CO_2, H_2O y biomasa (Ercoli et al 2003)

Para obtener el consorcio microbiano interactivo se seleccionó una biopila en proceso de degradación de hidrocarburo ubicada en el centro oeste de Argentina (Fig. 2) y de ese suelo se transfirieron 3 g de suelo a un Erlenmeyer con 25 ml del medio de cultivo indicado en la tabla IV por triplicado sin esterilizar (Fig. 3). La fuente de carbono fue el mismo hidrocarburo presente en el suelo más 1 ml de combustible diésel grado 3 comercial (gasoil) por Erlenmeyer (Gálvez et al 2018, Sing et al 2004, Mergesin et al 2005)

Tabla IV. Composición medio de cultivo

Macronutrientes		Micronutrientes	
Na Cl	5,0 g/l	$FeSO_4.7\ H_2O$	275 mg/l
$Mg\ SO_4$	0,2 g/l	$ZnSO_4.7\ H_2O$	550 mg/l
$NH_4\ PO_4\ H_2$	1,0 g/l	$CaCl_2.2\ H_2O$	110 mg/l
$K_2\ PO_4\ H$	1,0 g/l	$MnCl_2.4\ H_2O$	275 mg/l
$(NH_4)_2\ SO_4$	3,0 g/l	$CuSO_4.5\ H_2O$	110 mg/l
Extracto de levadura	1,0 g/l	$CoSO_4.7\ H_2O$	110 mg/l
Micronutrientes	10 ml/l	KCl	2750 mg/l
		NaCl	2750l



Figura 2. Biopilas en proceso de tratamiento de suelos empetrolados

 ISBN 978-987-1323-91-3

Se llevaron a un agitador orbital (New Brunswick) durante 72 horas a 180 rpm y 29-30°C. Luego, para estabilizar el consorcio se transfirieron 5 ml del líquido sobrenadante a otros erlenmeyer con el mismo medio de cultivo esterilizado, pero como fuente de carbono se utilizó sólo gasoil comercial en una concentración de 40 ml/l y se llevó a agitador orbital por otras 72 hs a 29-30 °C.



Figura 3. Vista del cultivo en fase inicial de selección

Una vez estabilizado el consorcio microbiano, se procedió a utilizarlo como inóculo para la degradación de Tebuconazol, debido a la capacidad degradadora verificada para la descontaminación de suelos empetrolados. Se procedió a estudiar la biodegradación del Tebuconazol en solución acuosa, con la máxima concentración del producto comercial diluido en agua destilada estéril con medio nutritivo sin fuente de carbono. Se utilizó el mismo medio de sales y oligoelementos que en el proceso de obtención del consorcio microbiano interactivo. En esta etapa se trabajó con medio estéril.

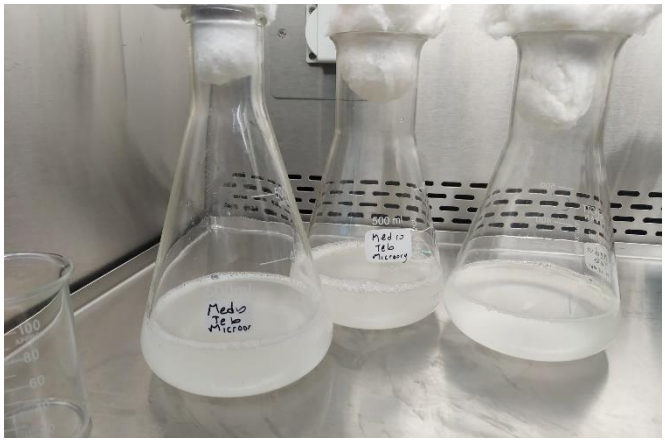


Figura 4. Erlenmeyers con medio de cultivo estéril, tebuconazol e inóculo

A este medio se le incorporó solución comercial de tebuconazol (al 43 %) a razón de 2 ml/l. El proceso de degradación se llevó a cabo en erlenmeyers agitados de 500 ml con 200 ml de medio estéril y 0,4 ml de tebuconazol por Erlenmeyer (Fig. 4) Se inocularon con 20 ml de solución de microorganismos degradadores de HC y se llevaron a agitación a 28 °C a 180 rpm. Se mantuvieron un periodo de una semana, Asimismo se realizó un ensayo sin inóculo para determinar las pérdidas abióticas. Posteriormente se realizaron ensayos de mayor duración de 12 días. (Gálvez et al 2018, Margesin et al 2005, Speight et al 2018)

El tebuconazol se analizó por cromatografía en fase líquida de alta presión, Método INTA-MZA-PT-356 (Estándar interno de INTA), condiciones cromatográficas LC-MSMS Waters- Acquity UPLC H-Class, detector cuadrupolo Tandem Waters Xevo – TQD. Columna utilizada: BEH C18, flujo 0,2 ml/min.

En el ensayo se trabajó en condiciones de máxima concentración en agua (en base a la solubilidad) para estudiar la capacidad de degradación del consorcio con las mínimas restricciones de transferencia de materia, en donde la toxicidad del compuesto es más acentuada que en suelo en donde se ve disminuida por interacciones con la matriz sólida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de los ensayos preliminares a 5 días se muestran en la tabla V y los resultados a 7 y 12 se muestran en la tabla VI En este último caso se indican los resultados corregidos por las pérdidas abióticas.

Tabla V. Ensayo preliminar de degradación a 5 días.

Tiempo (días)	Concentración (mg/kg)	Degradación (%)
0	2135,5	0
5	837	61%
Blanco	1769	17%

Tabla VI. Ensayo de degradación a 12 días (se descontaron las pérdidas abióticas)

Tiempo (días)	Concentración (mg/kg)	Degradación (%)
0	2444,2	0 %
7	820,2	66 %
12	682,2	72 %

 ISBN 978-987-1323-91-3

CONCLUSIONES

- El estudio de riesgo indicó que el Tebuconazol presenta riesgo tóxico en condiciones de máxima concentración en agua considerando la ingesta de agua subterránea.
- Los resultados preliminares indican que el compuesto es biodegradable y eliminando los efectos abióticos en el proceso se llegó a una degradación del orden de 44 % en un periodo de 5 días. En ensayos de mayor duración se obtuvieron resultados del orden de 55 a 60 %.
- En este caso se reducen al mínimo las restricciones de transferencia de materia y al mismo tiempo se maximiza el efecto tóxico del compuesto sobre los microorganismos
- En el caso de un derrame en suelo debido a las restricciones de transferencia de materia que reducen la biodisponibilidad se puede atenuar el efecto tóxico sobre los microorganismos

REFERENCIAS

ASTM. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. Designation: E1739 – 95 (Reapproved 2015)

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 Copyright 2001, SPE 69445. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Buenos Aires, Argentina, 25–28 March 2001.

Ercoli, Eduardo; Cecilia Calleja; Silvina Videla·; Oscar Segura; José Gálvez; Cecilia López; José Cantero; Guillermo Tettamanti; Cecilia Medaura; Mariela DiPaola; Sergio Vardaro; Roberto Caso. TECHNOLOGY EVALUATION REPORT FOR BIOREMEDIATION IN *REPSOL YPF*, NEUQUÉN, ARGENTINA. 2nd International Conference of Petroleum Biotechnology. Mexico DF. Formato CD. 7 de Noviembre de 2003. ISBN 968-489-018-4

Essence Group. (2013). *Productos-Insecticida: Lambda-cihalotrina*. Obtenido de Essence: Eseence Group: http://www.essencechem.es/product/lambdacihalotrina.html.

Gálvez J.; Alonso Molina, V.; Cantero, J.; López, A.;Pineda, I.; Vardaro, S. Diseño de protocolos de tratabilidad de suelos contaminados. Actas de Trabajos Completos E-ICES 12. 191-202. (2018) ISBN 978-987-1323-61-6

López, Erick; Cisneros, Salvador; Ochoa, Jessica-Procesos de bioestimulación para la remediación de suelos agrícolas contaminados con tebuconazol y cialotrina. Revista de Simulación y Laboratorio. Septiembre 2016 Vol.3 No.8 1-9. Bolivia

Margesin, Rosa and Franz Schinner (Eds.) Manual for Soil Analysis – Monitoring and Assessing Soil Bioremediation Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005 ISBN-10 3-540-25346-7

Nufarm. (21 de Junio de 2014). *Hoja técnica Tebuconazole*. Obtenido de Nufarm: Grow a better tomorrow.

Singh Ajay and Owen P, Ward (editors) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004 ISBN- 978 3 540 21020 7

Speight, James G.; El-Gendy; Nour Shafik. Introduction to Petroleum Biotechnology Elsevier (2018)

ESTUDIO DE CALIDADES METÁLICAS EN ELEMENTOS DE FIJACIÓN PERTENECIENTES AL HISTÓRICO FERROCARRIL CENTRAL ARGENTINO (FCCA)

Marcos Giupponi[a], Miguel Franetovich[b], Patricia Carrizo[c], Cecilia Deyá[b], Leonardo Bianchi[b] Carlos Villalonga[b], Hugo Alfonso[d]

[a]*Becario Proyecto PID: Ingeniería Inversa aplicada al estudio de Rieles Ferrovairios, Universidad Tecnológica Nacional Regional Mendoza, UTN FRM, ARGENTINA*
[b]*Integrante Proyecto PID: Ingeniería Inversa aplicada al estudio de Rieles Ferrovairios, Universidad Tecnológica Nacional Regional Mendoza, UTN FRM, ARGENTINA*
[c] *Directora Proyecto PID: Ingeniería Inversa aplicada al estudio de Rieles Ferrovairios, Área de Arqueometalurgia,Laboratorio de Metalurgia, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza,UTN FRM, ARGENTINA*
[d] *Museo Ferroviario de San Nicolás, San Nicolás de los Arroyos, Pcia. de Buenos Aires*

e-mail: jgiupponi93@hotmail.com

RESUMEN

La investigación consiste en el estudio metalográfico de elementos de ferrocarril pertenecientes al Museo Ferroviario de San Nicolás. El museo de carácter privado fue inaugurado en el año 2019, consta de alrededor unas 200 piezas relacionadas con los ferrocarriles. El mencionado museo ha provisto de las piezas metálicas de ferrocarril para esta investigación, con el objetivo de obtener más información que les agregue valor y genere mayor interés en la comunidad por la historia e importancia de los ferrocarriles nacionales. Los especímenes que se estudiaron fueron un clavo de fijación y un perno roscado, pertenecientes al Ferrocarril Central Argentino (FCCA), el cual fue una empresa de capitales teóricamente británicos que operó en las provincias argentinas de Santa Fe y Córdoba durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, su nombre en inglés era «Central Argentine Railway». Fue fundado en el año 1866 y por primera vez en 1902 se unifica con el Ferrocarril Buenos Aires a Rosario (FCBAR). Luego, el 1 de marzo de 1948 fue nacionalizado y pasa a ser parte del Ferrocarril General Bartolomé Mitre. En la presente investigación, se realizaron distintos análisis sobre las piezas entre ellos: se tomaron mediciones de dureza escala Rockwell (HRB), composición química con espectrometría de plasma, estudios micrográficos y macrográficos de los elementos ferroviarios. Los resultados obtenidos se utilizaron para caracterizar y observar las propiedades y calidades de estos materiales históricos y compararlos con materiales modernos.

Palabras Clave: Fijaciones, Ferrocarril, Metalúrgicas, Calidades, Museo.

INTRODUCCIÓN

Las piezas que se estudian en este trabajo son elementos de fijación pertenecientes al histórico Ferrocarril Central Argentino (FCCA), a saber, un clavo de fijación y un perno roscado. Los clavos de fijación se colocan en los durmientes y sirven para evitar variaciones en el ancho de trocha. Por otro lado, los pernos roscados permiten la unión de tramos de vías por medio de eclisas. Esta investigación es parte del PID Homologado:

“Ingeniería Inversa Aplicada al Estudio de Ferrocarriles Históricos (código: 0008394), el cual se desarrolla en el Área de Arqueometalurgia, dependiente del Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Argentina.

Las piezas donadas para su estudio provienen del museo ferroviario de San Nicolás, inaugurado el 24 de noviembre de 2019. El Museo funciona en la casa de la familia del fundador, Hugo Alfonso, el mismo permite a los visitantes observar y aprender no sólo sobre la historia de los ferrocarriles en Argentina pero también sobre la gente involucrada y su influencia en la actualidad (Andrín 2022).

CONTEXTO HISTÓRICO

El Ferrocarril Central Argentino (FCCA) debe sus inicios al ingeniero norteamericano Allan Campbell, quien propuso la idea el 5 de septiembre de 1854. Alan Campbell tenía experiencias previas en trabajos de ferrocarriles, pues ya actuaba cómo ingeniero principal en la línea de New York a Harlem. Campbell presenta el 3 de noviembre de 1855 el informe sobre el ferrocarril, incluyendo información sobre el recorrido, las técnicas, precios y costos. El tramo que se quería construir conectaría las ciudades de Rosario y Córdoba y previa la importancia de Villa Nueva cómo nodo para futuras expansiones hacía el norte y oeste del país (Ortiz 1940, 87-89).

En un principio se le concede a José Buschental la autorización para comenzar la construcción del ferrocarril. Sin embargo, esta fue prorrogada y se le extiende esta autorización a Guillermo Wheelwright. El 5 de septiembre de 1862 se vota la ley que finalmente permite el comienzo de la construcción a Wheelwright, por un presupuesto de casi el doble de aquel calculado por Campbell (Ortiz 1940, 99).

La construcción en si de la vía férrea comienza el 25 de abril de 1863. El primer tramo entre Rosario y Cañada de Gómez se abre el 1° de mayo de 1866 y el 1° de septiembre se llega hasta Villa Nueva. Se llega a Córdoba el 13 de marzo de 1870 y es inaugurada por el presidente Domingo Faustino Sarmiento. En ese momento era la vía más larga del país (Ortiz 1940, 119). En el año 1887 se autorizan las construcciones de nuevos ramales desde Cañada de Gómez y el permiso del aumento del capital disponible en 1.000.000 de libras. En 1890, el FCCA toma control de el Ferrocarril del Norte, con lo cual lo extiende hasta Buenos Aires. En 1890, el Central Argentino también compra a Western Railway (Ferrocarriles del Oeste) algunos de sus ramales en Buenos Aires. (Ortiz 1940, 162)

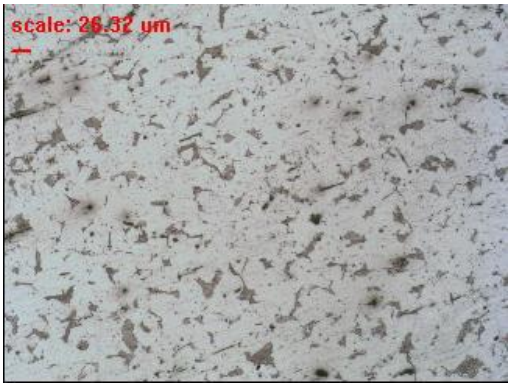
En cuanto a historia más reciente, siendo Juan Domingo Perón el presidente de la Nación, los ferrocarriles que se encontraban bajo capitales británicos, cómo el Central Argentino fueron nacionalizados el 1° de marzo de 1948. El Ferrocarril Central Argentino pasó a denominarse Ferrocarril Nacional General Bartolomé Mitre (Boletín Oficial de la República Argentina 1948). Con la creación de la Empresa Ferrocarriles del Estado Argentino, esta se encargó de la organización y mantenimiento de los elementos pertenecientes a los ferrocarriles.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las piezas recibidas para el estudio se muestran en la (Fig. 1.a y 1.b). Se cortaron longitudinalmente en dos mitades, se prepararon sendas probetas y se trabajó sobre una de las mitades de cada pieza. Posteriormente, se realizó el proceso de lijado siguiendo una secuencia de lijas de 80 – 120 – 600 – 2500 (granos/cm2). A continuación, se pulieron ambas mitades hasta pulido espejo. Para las micrografías, el ataque fue de escasos segundos con reactivo Nital al 2% y luego se observaron con microscopio metalográfico (Fig. 2.a y 2.b) (Scott D., 1991). En el caso del estudio macrográfico, el ataque consistió en suspender ambas mitades en reactivo Nital 2% por un lapso de 2 horas y se observaron con lupa estereoscópica (Fig. 3.a y 3.b) (Fig. 4.a y 4.b). Se realizó el estudio de la composición química y la medición de dureza (Tablas I y II) con espectroscopia de plasma y durómetro portátil, respectivamente.

a.  **b.** 

Figura 1. a. Clavo de fijación. **b.** Perno Roscado

a. 

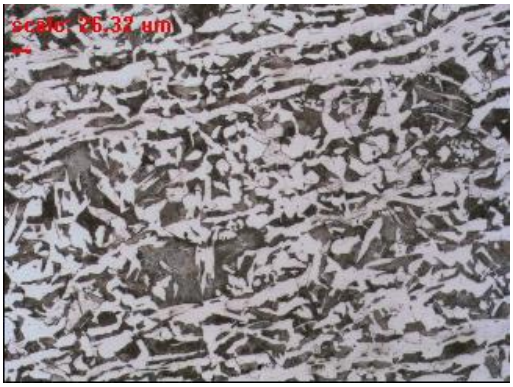
b. 

Figura 2. a. Micrografía clavo de fijación. Aumento: 100X. **b.** Micrografía perno roscado. Aumento: 100X.

 ISBN 978-987-1323-91-3

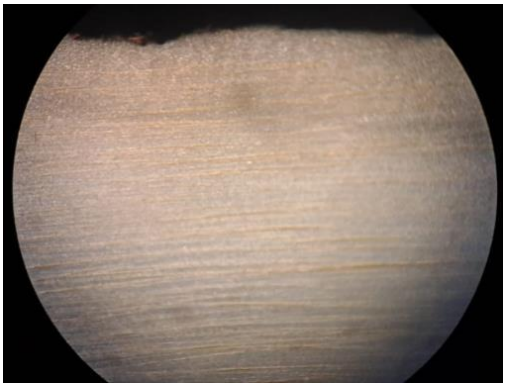
a.  **b.** 

Figura 3. Macrografías del clavo de fijación **a.** General **b.** Zona media del eje. Aumento: 0.80µm.

a.  **b.** 

Figura 4. Macrografías perno roscado **a.** General **b.** Zona puntual de cabeza. Aumento: 0.80µm

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso la micrografía del clavo (Figura 2.a), se observa una matriz de ferrita combinada con perlita de un acero de bajo carbono (0.12%C). Se trata de un acero al carbono con borde donde se aprecia un grano fino de matriz ferrita y partículas de cementita en el borde de grano. La micrografía de la (Figura 2.b), correspondiente al perno, se trata de un acero de alta resistencia de bajo carbono (0.35%C) con estructura de ferrita (zona clara) y perlita (zona oscura), según (ASM International 1995). En las macrografías del clavo (Figura 3.a y 3.b.), se observan las fibras características de la deformación plástica para un acero al carbono laminado (Lindenvald 1980).En las macrografías correspondientes al perno roscado (Figura 4.a. y 4.b.), se puede apreciar claramente las fibras del material, formadas por bandas de ferrita y perlita, en la zona de la cabeza del perno, las cuales indican un proceso de forjado en frio. Se observa presencia de algunos poros en el área.

Tabla I. Composición química y dureza de clavo de fijación

Elemento	% m/m	Dureza Rockwell (HRB)	SAE 1012 (UNS G10120)
Fe	99.2	48.7	99,16 - 99,6
C	0.12	51.0	0,10 - 0,15
Si	0.009	47.1	-----
Mn	0.40	47.2	0,30 - 0,60
P	0.063	43.7	≤0,040
S	0.033	54.9	≤0,050
Cr	0.013	50.9	-----
Mo	0.003	49.3	Dureza Rockwell (HRB)
Ni	<0.005	47.5	60

Tabla II. Composición química y dureza de perno roscado

Elemento	% m/m	Dureza Rockwell (HRB)	SAE 1035 (UNS G10350)
Fe	98.4	46,3	98,63 - 99,09
C	0.35	50,9	0,31 - 0,38
Si	0.06	43,4	-----
Mn	0.82	53,2	0,60-0,90
P	0.067	66,3	≤0,040
S	0.081	40,0	≤0,050
Cr	0.016	51,3	-----
Mo	0.003	52,5	Dureza Rockwell (HRB)
Ni	0.009	44,7	89

En cuanto a su comparación con materiales modernos, podemos ver que según las Tablas I y II, que los materiales históricos de fijación estudiados son semejantes a lo que en la actualidad se conoce como aceros al carbono SAE 1012 y SAE 1035. Adicionalmente, y según lo especificado en (IRAM-FA 1983) de bulones para vías, las piezas de fijación para los rieles se fabrican siguiendo una variedad de estándares que consideran dimensiones, materiales, composición química, dureza y tolerancias, entre otros. Precisamente en cuanto a la composición química de los elementos de fijación, ver Tabla III.

Tabla III. Composición química de clavos de fijación actuales.

%C	%Mn	%Si	%P	%S
0,37 - 0,75	0,86 - 1,74	≤ 0,30	<0,05	<0,05

Los elementos de fijación tales como los clavos de fijación y pernos roscados suelen fabricarse a partir de una única pieza maciza a la que, mediante diferentes mecanizados, se le da la forma deseada. En el caso de los pernos, uno de los procesos es aquel por el

 ISBN 978-987-1323-91-3

cual se forma la rosca. Las piezas que se utilizan son tratadas superficialmente para darles mejores propiedades.

CONCLUSIONES

Considerando los estudios de micrografía, valores de composición química y dureza obtenidos en estos elementos de fijación históricos y comparándolos con los valores para los elementos de fijación ferroviarios actuales, podemos decir que el material metálico histórico cumple con las especificaciones estandarizadas. Desde el punto de vista de la calidad del material, según lo evaluado a partir de los estudios macrográficos, se concluye que el material presenta buena calidad y ha sido conformado mediante un proceso de fabricación controlado.

REFERENCIAS

Andrín, Lucas. *Radio Noba.* 3 de junio de 2022. https://radionoba.com.ar/noticias/locales/5192/museo-ferroviario-san-nicolas.

ASM International. *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstrutures.* 9th. 1995.

*Boletín Oficial de la República Argentina.*27 de octubre de 1948.

IRAM-FA. *Bulons for road.* Standard L 70-06. 1983.

Lindenvald, Dra. Nora. *La estructura de los metales.* 3ra Edición. Editorial Géminis S.R.L, 1980.

Ortiz, Raul Scalabrini. *Historia de los Ferrocarriles Argentinos.* 7ma EDICIÓN. Buenos Aires: Reconquista, 1940.

Scott, David A. *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals.* Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute in association with Archetype Books, 1991.

INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN SIMPLIFICADA DE EDIFICACIONES PRE- Y POST-EVENTO SÍSMICO

Miguel D. Granda [a], Hernán D. Xargay [a,b]

[a] *Departamento de Construcciones y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*
[b] *Departamento ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ARGENTINA.*

e-mail: miguelgrandats@gmail.com; hxargay@fi.uba.ar

RESUMEN

Un evento sísmico puede causar importantes daños en elementos estructurales (vigas, columnas) y no estructurales (cerramientos de mampostería, vidrios) que componen las edificaciones, poniendo en riesgo la seguridad de las personas que las habitan y/o transitan. En la actualidad, en Argentina no existe reglamentación o normativa de alcance nacional que especifique procedimientos estandarizados para la evaluación rápida de edificaciones pre-evento o post-evento sísmico. Por lo tanto, resulta de gran interés social avanzar con su redacción y para ello es fundamental revisar los procedimientos utilizados en otros países de la región y del resto del mundo. En este trabajo se describe la metodología del manual P-154 de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) para realizar inspecciones visuales rápidas pre-evento y evaluar la vulnerabilidad sísmica potencial de diversos tipos de edificaciones. A partir de la evaluación, se clasifica a las construcciones en tres categorías en cuanto a daños y seguridad de los ocupantes frente a un sismo: edificios con baja, media o alta vulnerabilidad. Como resultado, se deriva si corresponde profundizar los estudios y eventualmente tomar medidas de refuerzo para reducir su vulnerabilidad. Por otra parte, inmediatamente después de un evento sísmico es indispensable realizar inspecciones rápidas a fin de verificar y catalogar el estado de las construcciones afectadas con pancartas que manifiesten a la población su nivel de riesgo y usabilidad. En general, se clasifican de acuerdo a su nivel de daño con los colores del semáforo: verde (seguro), amarillo (uso restringido) o rojo (inseguro). En este caso post-evento, se describe la metodología de la Guía de Diseño 5 de Ecuador, basada en el mundialmente utilizado reporte ATC-20-1.

Palabras Clave: Edificaciones, Inspección, Vulnerabilidad sísmica, FEMA, Riesgo.

INTRODUCCIÓN

En América Latina, la normativa sismorresistente ha ido evolucionando como respuesta a la creciente actividad sísmica en la región, un fenómeno que, como destaca Alarcón (2023), impulsa la creación de regulaciones destinadas a mitigar el riesgo sísmico. En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones sobre la vulnerabilidad sísmica de estructuras en distintas zonas, como menciona Goitia (2023), con el fin de evaluar su comportamiento ante eventos sísmicos.

En este contexto, Chimbo (2020) subraya la importancia de las técnicas de evaluación de vulnerabilidad sísmica, conocidas como “técnicas de Screening”. Estas técnicas, desarrolladas por ingenieros a lo largo del tiempo, se basan en la experiencia adquirida mediante la evaluación de daños en edificaciones afectadas por sismos. Según Kham et al. (2019), la literatura presenta diversas metodologías de inspección visual rápida

(Rapid Visual Screening, RVS) desarrolladas en distintos países, cada una adaptada a las condiciones locales.

En el trabajo realizado por Karapinar & Özbay (2022), se indica que la metodología de evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras mediante RVS fue documentada por primera vez por la Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA). En este sentido se hace referencia a la investigación realizada por Castro (2019), en la cual destaca que la primera edición de los manuales FEMA-154 "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook", y FEMA 155 "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation", fue publicada en 1988, siendo elaborada por el Consejo de Tecnología Aplicada a solicitud de FEMA.

En el estudio de Wyser (2019), se menciona que el formulario FEMA-154 fue desarrollado para obtener un índice valorativo y categorizar los edificios mediante un análisis cualitativo, de forma tal de establecer el tipo de intervención o refuerzo que necesita la estructura según sea el caso de estudio.

Así mismo, el manual FEMA P-154 hace referencia a la metodología de procedimientos para la evaluación de la seguridad de la edificación después de un terremoto ATC-20-1: Field Manual: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings (ATC, 2005). En este último, se proporcionan dos niveles de evaluación, rápida y detallada, para valorar los edificios dañados por terremotos y clasificarlos como "Inspeccionados" (sin restricción de ocupación, indicado con un cartel verde), "De uso restringido" (indicado con un cartel amarillo) o "Inseguros" (indicado con un cartel rojo), según el resultado de dicha metodología de evaluación.

Como ejemplo regional latinoamericano, vale la pena citar a la Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015 (MIDUVI 2016), que está basada en la metodología de ATC-20-1 para evaluar vulnerabilidad sísmica en edificaciones. En la misma, se resalta la importancia de detallar cada sección de la evaluación y colocar carteles en las edificaciones evaluadas acorde a los resultados obtenidos para informar a la sociedad civil de los riesgos inherentes.

En Argentina, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, 2023) indica que la mayor actividad sísmica se concentra en las regiones centro-oeste y noroeste, lo que pone de manifiesto la constante amenaza sísmica en estas áreas y la necesidad de evaluar la seguridad e integridad de las edificaciones vulnerables.

En los últimos años, la importancia de evaluar y mitigar la vulnerabilidad sísmica se ha visto reforzada por varios terremotos de gran magnitud que han causado devastación en diversas partes del mundo. Eventos como el terremoto de Turquía en 2023, que dejó miles de víctimas y una significativa destrucción de infraestructuras; el terremoto de Ecuador en 2023, que afectó gravemente a varias provincias del país; el devastador terremoto de Chile en 2010, uno de los más potentes jamás registrados; y el catastrófico terremoto de Japón en 2011, seguido de un tsunami y la crisis nuclear de Fukushima, subrayan la necesidad imperiosa de contar con metodologías efectivas para la evaluación rápida y precisa de edificaciones antes y después de un evento sísmico. Estos incidentes destacan la relevancia del presente trabajo en la prevención y respuesta ante desastres naturales.

En base a lo expuesto, y ante la carencia de reglamentación o normativa de alcance nacional que especifique procedimientos estandarizados para la evaluación rápida de edificaciones, pre y post-evento sísmico, la presente investigación propone analizar y describir metodologías de inspección visual rápida tanto antes y después de eventos sísmicos. Para ello, se utilizarán los formularios proporcionados por FEMA P-154 y ATC-20-1, respectivamente. Se estudiará su aplicabilidad en el contexto sísmico argentino y su idoneidad para evaluar la vulnerabilidad sísmica de construcciones en zonas de alto riesgo sísmico.

MÉTODOLOGÍAS

INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA FEMA P-154 PRE-EVENTO SÍSMICO

La metodología empleada en este trabajo se basa en el manual FEMA P-154 "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook", desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicada a solicitud de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA). Especificamente, se describe la sección que concierne al formulario de toma de datos de Nivel 1 para evaluar edificios en una región sísmicamente vulnerable.

Según se explicita en el manual FEMA P-154 (2016), esta metodología consiste en un procedimiento de inspección visual rápida (RVS) para identificar, clasificar y examinar edificios que son potencialmente peligrosos desde el punto de vista sísmico. Por lo que, una vez identificados y catalogados como potencialmente peligrosos, estos edificios deben ser sometidos a una evaluación detallada por un profesional experimentado en diseño estructural y sísmico. Esta evaluación avanzada es crucial para determinar con precisión si la estructura representa un verdadero peligro sísmico. Sin embargo, este análisis detallado requiere significativamente más recursos y tiempo en comparación con el proceso de evaluación rápida, lo que subraya la importancia del RVS como una herramienta inicial de filtrado.

La metodología de RVS desarrollado por FEMA P-154, emplea una metodología basada en un procedimiento que no requiere un análisis estructural, y que se realiza desde la vereda del edificio, complementando con un formulario de recopilación de datos (Ver Fig. 1).

El proceso comienza con la recopilación de información básica del edificio, como su nombre, ubicación, y detalles del inspector, junto con una descripción general del edificio que incluye su uso, número de pisos y materiales de construcción predominantes. También se anota la fecha de construcción aproximada, lo cual es relevante para la evaluación de la resistencia sísmica. Durante la inspección, se registran los daños visibles en el exterior del edificio, como grietas en las fachadas y desmoronamiento de materiales, así como daños en el interior, incluyendo fisuras y grietas en paredes internas y daños en techos o pisos. Estas observaciones permiten identificar posibles debilidades estructurales que podrían representar riesgos sísmicos. El formulario también permite evaluar la vulnerabilidad estructural general del edificio, considerando el tipo de sistema estructural y las conexiones entre sus componentes, así como su conformidad con las normas sísmicas recomendadas. Además, se identifican y clasifican riesgos potenciales, como problemas en las conexiones de los muros o el tipo de cimentación, lo que ayuda a priorizar edificios que necesitan una inspección más exhaustiva. Finalmente, el formulario proporciona recomendaciones iniciales basadas en

la evaluación visual, que pueden incluir la necesidad de una evaluación estructural más detallada, la implementación de medidas de mitigación temporales o restricciones en el uso del edificio. El proceso concluye con la firma y fecha del inspector, certificando la información registrada y la validez de la evaluación realizada. En conclusión, con los datos recopilados durante la evaluación, se calcula una puntuación que indica el rendimiento sísmico esperado del edificio. Esta puntuación permite determinar el grado de vulnerabilidad (baja, media, alta) del edificio.

La Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras (NEC 2015) sugiere que los resultados de la evaluación de vulnerabilidad sísmica pueden utilizarse como una base sólida para la implementación de programas de mitigación de riesgos. Estos programas son esenciales para reducir la probabilidad de colapsos estructurales y minimizar las pérdidas humanas y económicas en caso de un sismo. Además, estos resultados permiten la creación de inventarios detallados de edificaciones clasificadas según su uso, lo que facilita la identificación de las estructuras más vulnerables frente a eventos sísmicos. Por ejemplo, edificios escolares, hospitales y centros de atención pública, debido a su importancia social y alta ocupación, pueden priorizarse para intervenciones de refuerzo estructural o reconstrucción. De esta manera, se pueden destinar los recursos disponibles de manera más eficiente, enfocándose en las estructuras que presentan mayores riesgos para la población.

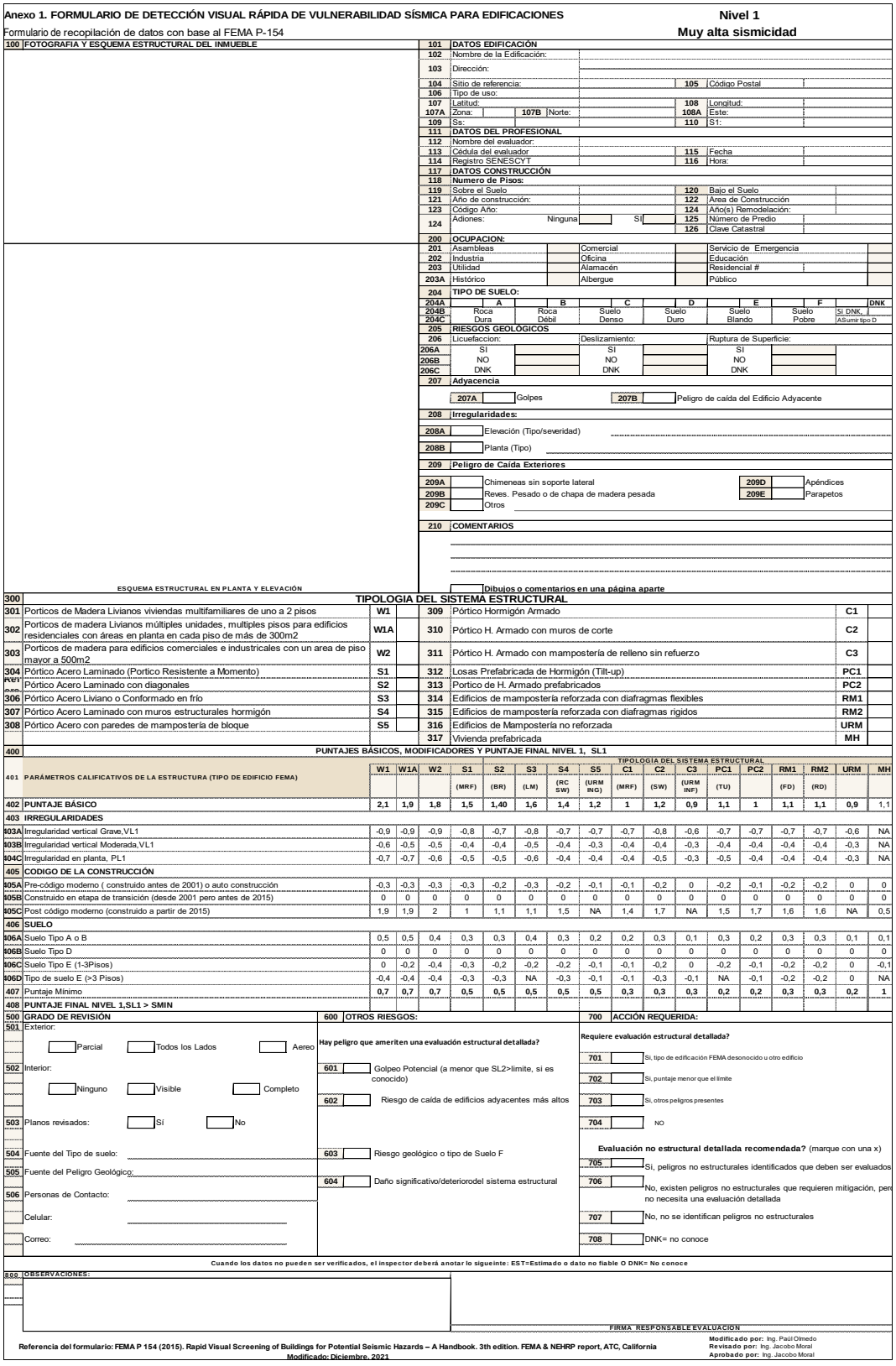
El procedimiento de RVS de FEMA P-154 para completar el formulario de Nivel 1 se resume en los siguientes pasos:

1. Verificar y actualizar la información de identificación del edificio; incluida la revisión de planos (si es posible),
2. Caminar alrededor del edificio para identificar el número de pisos y la forma, para realizar un boceto de planta y elevación.
3. Fotografiar el edificio;
4. Determinar y documentar la ocupación;
5. Revisar el tipo de suelo y los peligros geológicos identificados;
6. Identificar problemas de adyacencia, irregularidades en el edificio y cualquier peligro potencial de caída exterior;
7. Agregar cualquier comentario sobre condiciones o circunstancias inusuales que puedan afectar la evaluación;
8. Identificar el material de construcción, el sistema de carga por gravedad y el sistema de resistencia a la fuerza sísmica para identificar el tipo de edificio de FEMA (ingresando al edificio, si es posible, para facilitar este proceso) y marcando con un círculo la puntuación básica en el formulario de recopilación de datos;
9. Encerrar en un círculo los modificadores de puntuación del atributo de rendimiento sísmico apropiados (por ejemplo, irregularidades, fecha de diseño y tipo de suelo);
10. Determinar la puntuación final de Nivel 1, SL1 (ajustando la Puntuación Básica del Paso 8 con los modificadores de puntuación identificados en el Paso 9); y

11. Completar la sección de resumen en la parte inferior del formulario (es decir, Alcance de la revisión, Otros peligros y Acción requerida).

Finalmente, el uso del formulario de Nivel 1 de FEMA P-154 permite obtener una calificación rápida sobre la vulnerabilidad sísmica del edificio evaluado. Esta calificación, representada por el puntaje final SL1, proporciona una guía preliminar sobre qué estructuras pueden requerir una evaluación más exhaustiva. Si el edificio obtiene un puntaje que sugiere vulnerabilidad, se debe considerar la posibilidad de una evaluación más detallada y técnica, tal como la que se lleva a cabo en un análisis de Nivel 2. Así, el procedimiento RVS de FEMA-154 no solo facilita la identificación inicial de edificios potencialmente peligrosos, sino que también optimiza la asignación de recursos, asegurando que se enfoquen en las estructuras con mayor necesidad de intervención.

Existen otros métodos de evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica (RVS) desarrollados en diversos países, cada uno adaptado a sus contextos y normativas locales. Por ejemplo, en Japón, se utiliza un sistema conocido como ‘JBDPA’ (Japanese Building Disaster Prevention Association), que clasifica los edificios en función de su resistencia sísmica y utiliza un enfoque más detallado en comparación con FEMA-154. En Italia, el método de RVS incluye un enfoque más cualitativo, considerando aspectos arquitectónicos y constructivos específicos de las edificaciones históricas. Del mismo modo, Nueva Zelanda emplea el ‘Initial Evaluation Procedure’ (IEP), que ofrece un análisis preliminar basado en la vulnerabilidad sísmica de los edificios según el tipo estructural y su desempeño histórico. Aunque estos métodos varían en su aplicación, todos comparten el objetivo común de identificar de manera eficiente aquellas estructuras que necesitan una evaluación sísmica más detallada y, potencialmente, reforzar estructuralmente.



Anexo 1. FORMULARIO DE DETECCIÓN VISUAL RÁPIDA DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICACIONES — **Nivel 1**

Formulario de recopilación de datos con base al FEMA P-154 — **Muy alta sismicidad**

100 FOTOGRAFIA Y ESQUEMA ESTRUCTURAL DEL INMUEBLE

101 DATOS EDIFICACIÓN

102 Nombre de la Edificación:

103 Dirección:

104 Sitio de referencia: — 105 Código Postal

106 Tipo de uso:

107 Latitud: — 108 Longitud:

107A Zona: — 107B Norte: — 108A Este:

109 Ss: — 110 S1:

111 DATOS DEL PROFESIONAL

112 Nombre del evaluador:

113 Cédula del evaluador — 115 Fecha

114 Registro SENESCYT — 116 Hora:

117 DATOS CONSTRUCCIÓN

118 **Numero de Pisos:**

119 Sobre el Suelo — 120 Bajo el Suelo

121 Año de construcción: — 122 Area de Construcción

123 Código Año: — 124 Año(s) Remodelación:

124 Adiones: Ninguna ☐ SI ☐ — 125 Número de Predio

126 Clave Catastral

200 OCUPACION:

201	Asambleas		Comercial		Servicio de Emergencia
202	Industria		Oficina		Educación
203	Utilidad		Alamacén		Residencial #
203A	Histórico		Albergue		Público

204 TIPO DE SUELO:

	A	B	C	D	E	F	DNK
204A							
204B	Roca Dura	Roca Débil	Suelo Denso	Suelo Duro	Suelo Blando	Suelo Pobre	Si DNK,
204C							ASumir tipo D

205 RIESGOS GEOLÓGICOS

206 Licuefaccion: — Deslizamiento: — Ruptura de Superficie:

206A	SI	SI	SI
206B	NO	NO	NO
206C	DNK	DNK	DNK

207 Adyacencia

207A ☐ Golpes — 207B ☐ Peligro de caída del Edificio Adyacente

208 Irregularidades:

208A ☐ Elevación (Tipo/severidad)

208B ☐ Planta (Tipo)

209 Peligro de Caída Exteriores

209A ☐ Chimeneas sin soporte lateral — 209D ☐ Apéndices

209B ☐ Reves. Pesado o de chapa de madera pesada — 209E ☐ Parapetos

209C ☐ Otros

210 COMENTARIOS

ESQUEMA ESTRUCTURAL EN PLANTA Y ELEVACIÓN

☐ **Dibujos o comentarios en una página aparte**

300 TIPOLOGIA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

301	Porticos de Madera Livianos viviendas multifamiliares de uno a 2 pisos	W1	☐	309	Pórtico Hormigón Armado	C1
302	Porticos de madera Livianos múltiples unidades, multiples pisos para edificios residenciales con áreas en planta en cada piso de más de 300m2	W1A	☐	310	Pórtico H. Armado con muros de corte	C2
303	Porticos de madera para edificios comerciales e industriales con un area de piso mayor a 500m2	W2	☐	311	Pórtico H. Armado con mampostería de relleno sin refuerzo	C3
304	Pórtico Acero Laminado (Portico Resistente a Momento)	S1	☐	312	Losas Prefabricada de Hormigón (Tilt-up)	PC1
305	Pórtico Acero Laminado con diagonales	S2	☐	313	Portico de H. Armado prefabricados	PC2
306	Pórtico Acero Liviano o Conformado en frío	S3	☐	314	Edificios de mampostería reforzada con diafragmas flexibles	RM1
307	Pórtico Acero Laminado con muros estructurales hormigón	S4	☐	315	Edificios de mampostería reforzada con diafragmas rigidos	RM2
308	Pórtico Acero con paredes de mampostería de bloque	S5	☐	316	Edificios de Mampostería no reforzada	URM
				317	Vivienda prefabricada	MH

400 PUNTAJES BÁSICOS, MODIFICADORES Y PUNTAJE FINAL NIVEL 1, SL1

401 PARÁMETROS CALIFICATIVOS DE LA ESTRUCTURA (TIPO DE EDIFICIO FEMA)	TIPOLOGÍA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL																
	W1	W1A	W2	S1 (MRF)	S2 (BR)	S3 (LM)	S4 (RC SW)	S5 (URM ING)	C1 (MRF)	C2 (SW)	C3 (URM INF)	PC1 (TU)	PC2	RM1 (FD)	RM2 (RD)	URM	MH
402 **PUNTAJE BÁSICO**	2,1	1,9	1,8	1,5	1,40	1,6	1,4	1,2	1	1,2	0,9	1,1	1	1,1	1,1	0,9	1,1
403 **IRREGULARIDADES**																	
403A Irregularidad vertical Grave,VL1	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	NA
403B Irregularidad vertical Moderada,VL1	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	NA
404C Irregularidad en planta, PL1	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	NA
405 **CODIGO DE LA CONSTRUCCIÓN**																	
405A Pre-código moderno (construido antes de 2001) o auto construcción	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	0	0
405B Construido en etapa de transición (desde 2001 pero antes de 2015)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
405C Post código moderno (construido a partir de 2015)	1,9	1,9	2	1	1,1	1,1	1,5	NA	1,4	1,7	NA	1,5	1,7	1,6	1,6	NA	0,5
406 **SUELO**																	
406A Suelo Tipo A o B	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1
406B Suelo Tipo D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
406C Suelo Tipo E (1-3Pisos)	0	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	0	-0,1
406D Tipo de suelo E (>3 Pisos)	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	NA	-0,3	-0,1	-0,1	-0,3	-0,1	NA	-0,1	-0,2	-0,2	0	NA
407 Puntaje Mínimo	**0,7**	**0,7**	**0,7**	**0,5**	**0,5**	**0,5**	**0,5**	**0,5**	**0,3**	**0,3**	**0,3**	**0,2**	**0,2**	**0,3**	**0,3**	**0,2**	**1**
408 **PUNTAJE FINAL NIVEL 1,SL1 > SMIN**																	

500 GRADO DE REVISIÓN

501 Exterior:

☐ Parcial ☐ Todos los Lados ☐ Aereo

502 Interior:

☐ Ninguno ☐ Visible ☐ Completo

503 Planos revisados: ☐ SI ☐ No

504 Fuente del Tipo de suelo:

505 Fuente del Peligro Geológico:

506 Personas de Contacto:

Celular:

Correo:

600 OTROS RIESGOS:

Hay peligro que ameriten una evaluación estructural detallada?

601 ☐ Golpeo Potencial (a menor que SL2>limite, si es conocido)

602 ☐ Riesgo de caída de edificios adyacentes más altos

603 ☐ Riesgo geológico o tipo de Suelo F

604 ☐ Daño significativo/deteriodel sistema estructural

700 ACCIÓN REQUERIDA:

Requiere evaluación estructural detallada?

701 ☐ Si, tipo de edificación FEMA desonocido u otro edificio

702 ☐ Si, puntaje menor que el limite

703 ☐ Si, otros peligros presentes

704 ☐ NO

Evaluación no estructural detallada recomendada? (marque con una x)

705 ☐ Si, peligros no estructurales identificados que deben ser evaluados

706 ☐ No, existen peligros no estructurales que requieren mitigación, per no necesita una evaluación detallada

707 ☐ No, no se identifican peligros no estructurales

708 ☐ DNK= no conoce

Cuando los datos no pueden ser verificados, el inspector deberá anotar lo sigueinte: EST=Estimado o dato no fiable O DNK= No conoce

800 OBSERVACIONES:

FIRMA RESPONSABLE EVALUACIÓN

Referencia del formulario: FEMA P 154 (2015). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards – A Handbook. 3th edition. FEMA & NEHRP report, ATC, California

Modificado: Diciembre, 2021

Modificado por: Ing. Paúl Olmedo
Revisado por: Ing. Jacobo Moral
Aprobado por: Ing. Jacobo Moral

Figura 1. Formulario Nivel 1 para RVS.
Adaptado de: FEMA P 154-2016. Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards – A Handbook. 3th edition.

INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA ATC-20-1 POST-EVENTO SÍSMICO

La inspección visual rápida es una metodología crucial para la evaluación de la seguridad de edificios tras un terremoto. Esta técnica forma parte de un conjunto de procedimientos diseñados para determinar de manera expedita la seguridad estructural y facilitar una rápida toma de decisiones en situaciones de emergencia.

La metodología de evaluación post-evento sísmico, descrita en el manual ATC-20-1, se basa en los procedimientos de inspección para evaluar la seguridad de los edificios después de un terremoto. El ATC-20-1 establece tres niveles de evaluación post-evento: Evaluación rápida, Evaluación detallada y Evaluación de ingeniería. Este enfoque escalonado permite una respuesta eficiente en cuanto al uso de los recursos y adecuada en función del nivel de daño y la seguridad del edificio. En este trabajo nos enfocamos en la Evaluación rápida o de primer nivel.

A continuación, se referencia el proceso de inspección para evaluación rápida (Tabla I) explicado en la Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras (NEC, 2015).

Tabla I. Procesos de Inspección para Evaluación Rápida

Orden	Procedimiento
1	• Inspeccionar toda la parte exterior de la estructura. • Examinar y evaluar peligros existentes en estructuras dañadas por sismo.
2	• Identificar fisuras, asentamientos o cualquier señal de movimiento de tierra en el área ocupada por la estructura.
3	• Ingresar a la edificación (solamente si es posible) sin poner en riesgo su integridad, verificar daños estructurales y no estructurales (*Nunca entrar directamente a estructuras afectadas).* • Completar el formulario de Evaluación rápida de estructuras Post-evento sísmico.
4	• Evaluación: Investigar la edificación acorde a los criterios de Evaluación Rápida, marcar sus condiciones observadas según corresponda a criterio del inspector.
5	• Señalizar la estructura con el cartel correspondiente acorde a los resultados de la evaluación. • Detallar en el cartel si la inspección es “exterior” o “exterior e interior”.
6	• Informar a los ocupantes del edificio el significado del cartel colocado, acordonar el área y de ser necesario evacuar los ocupantes.

Nota: Adaptado de Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras NEC-2015.

La Evaluación Rápida es el primer nivel de análisis y se realiza con el objetivo de determinar rápidamente si un edificio es seguro para su ocupación o si debe ser restringido o cerrado. Según el Programa de Evaluación de Seguridad (2020), esta evaluación debe completarse en un tiempo estimado de entre 10 y 20 minutos por edificio. Su propósito es identificar y reportar en los momentos iniciales de la

emergencia la mayor cantidad posible de estructuras en términos de seguridad, facilitando así la priorización de la atención y la asignación de recursos desde los organismos de gestión nacionales.

FORMULARIO DE INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA

El formulario de Inspección Visual Rápida ATC-20-1 (ver Fig. 2) es una herramienta esencial en este proceso. Este formulario se utiliza para registrar de manera sistemática los daños observados en los edificios tras un evento sísmico. La correcta utilización y descripción de este formulario son fundamentales para una evaluación precisa de la magnitud de los daños, y para coordinar efectivamente las acciones de respuesta y recuperación en las áreas afectadas. Al registrar los daños observados, se proporciona una base sólida para la planificación de medidas correctivas y para la comunicación de la situación a los responsables de la gestión de emergencias. En la actualidad, numerosos países han adoptado el uso de aplicaciones móviles y nube de datos para recibir en tiempo real los resultados de las evaluaciones y optimizar el proceso de asistencia.

En la parte superior del formulario, se incluyen los datos básicos del edificio y de la inspección. Se debe registrar el nombre del proyecto, la ubicación exacta del edificio y la fecha y hora en que se realizó la inspección. Además, se debe indicar el nombre del evaluador y su información de contacto, así como un número de inspección único para facilitar el seguimiento y la documentación del proceso.

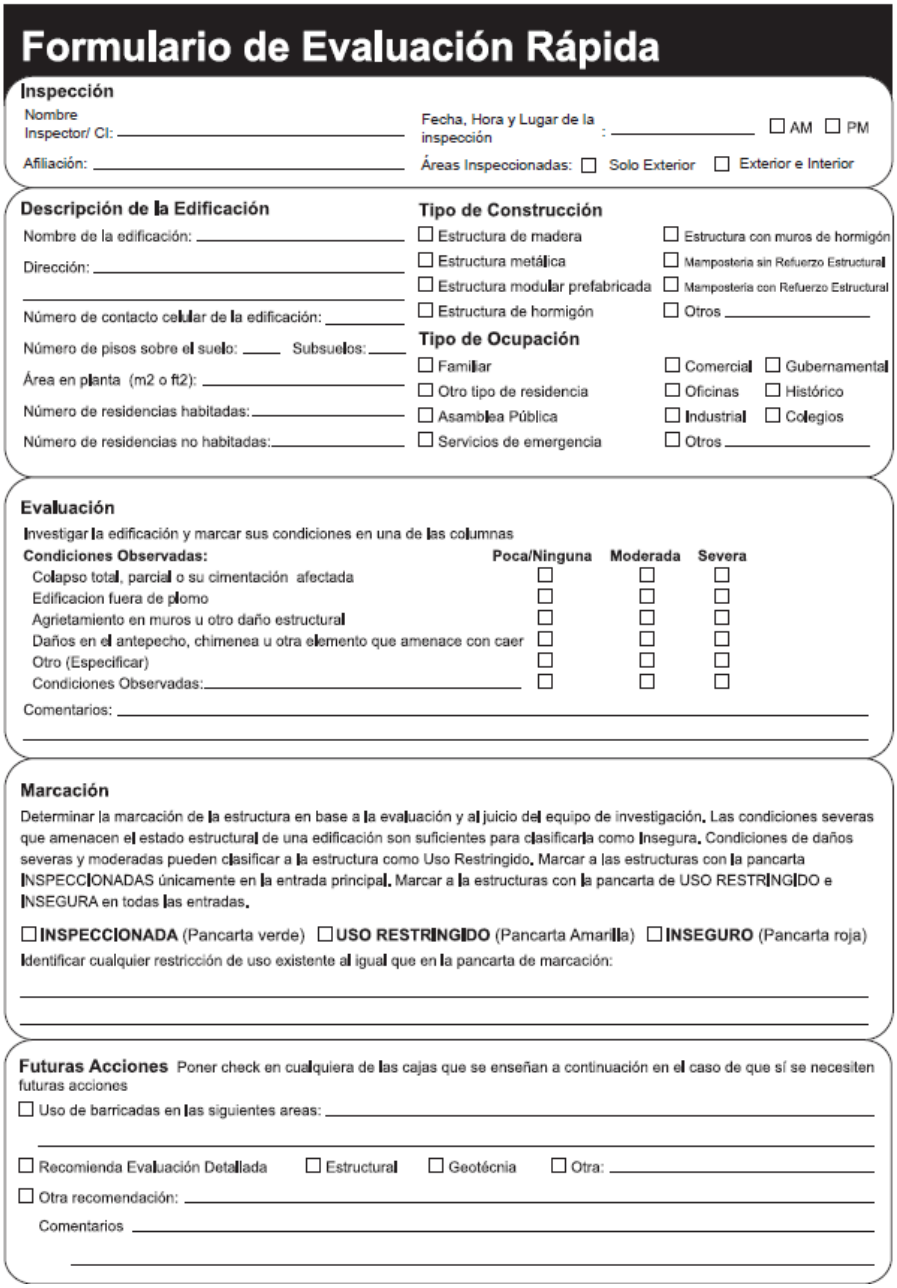
El formulario también proporciona una sección para describir de manera general el edificio. Aquí, se anotan detalles sobre el tipo de edificio, que puede ser residencial, comercial, industrial, entre otros, así como el número total de pisos o niveles y los principales materiales de construcción utilizados, como hormigón, acero o madera.

A continuación, el formulario permite registrar observaciones generales sobre el estado del edificio. Esta sección está destinada a capturar la condición del exterior y del interior del edificio, incluyendo la fachada, las paredes exteriores, así como los elementos interiores visibles como techos y pisos. Aunque esta parte del formulario se basa en observaciones visuales generales, proporciona una primera impresión del estado del edificio.

En la sección dedicada a los daños observados, el formulario permite describir detalladamente cualquier daño visible, como fisuras, deformaciones o caída de elementos. Se debe registrar la ubicación específica de estos daños, utilizando diagramas o planos esquemáticos si es necesario, para proporcionar una visión clara de la magnitud y la distribución de los daños.

El formulario también incluye una evaluación del nivel de daño. Aquí, se clasifica la severidad de los daños observados, desde daños leves hasta daños severos. Esta clasificación ayuda a determinar la gravedad de la situación y a guiar las decisiones sobre las acciones a seguir.

En la sección de futuras acciones o recomendaciones iniciales, el formulario proporciona espacio para sugerir acciones inmediatas basadas en la evaluación realizada. Esto puede incluir recomendaciones para restringir el uso del edificio, evacuar el área o realizar una inspección más detallada. También se incluyen notas sobre las precauciones de seguridad a seguir hasta que se complete una evaluación más exhaustiva.



Formulario de Evaluación Rápida

Inspección

Nombre Inspector/ CI: _____ Fecha, Hora y Lugar de la inspección : _____ ☐ AM ☐ PM

Afiliación: _____ Áreas Inspeccionadas: ☐ Solo Exterior ☐ Exterior e Interior

Descripción de la Edificación

Nombre de la edificación: _____

Dirección: _____

_____

Número de contacto celular de la edificación: _____

Número de pisos sobre el suelo: ____ Subsuelos: ____

Área en planta (m2 o ft2): _____

Número de residencias habitadas: _____

Número de residencias no habitadas: _____

Tipo de Construcción

☐ Estructura de madera
☐ Estructura metálica
☐ Estructura modular prefabricada
☐ Estructura de hormigón
☐ Estructura con muros de hormigón
☐ Mampostería sin Refuerzo Estructural
☐ Mampostería con Refuerzo Estructural
☐ Otros _____

Tipo de Ocupación

☐ Familiar
☐ Otro tipo de residencia
☐ Asamblea Pública
☐ Servicios de emergencia
☐ Comercial ☐ Gubernamental
☐ Oficinas ☐ Histórico
☐ Industrial ☐ Colegios
☐ Otros _____

Evaluación

Investigar la edificación y marcar sus condiciones en una de las columnas

Condiciones Observadas:	Poca/Ninguna	Moderada	Severa
Colapso total, parcial o su cimentación afectada	☐	☐	☐
Edificacion fuera de plomo	☐	☐	☐
Agrietamiento en muros u otro daño estructural	☐	☐	☐
Daños en el antepecho, chimenea u otra elemento que amenace con caer	☐	☐	☐
Otro (Especificar)	☐	☐	☐
Condiciones Observadas: _____	☐	☐	☐

Comentarios: _____

_____

Marcación

Determinar la marcación de la estructura en base a la evaluación y al juicio del equipo de investigación. Las condiciones severas que amenacen el estado estructural de una edificación son suficientes para clasificarla como Insegura. Condiciones de daños severas y moderadas pueden clasificar a la estructura como Uso Restringido. Marcar a las estructuras con la pancarta INSPECCIONADAS únicamente en la entrada principal. Marcar a la estructuras con la pancarta de USO RESTRINGIDO e INSEGURA en todas las entradas.

☐ **INSPECCIONADA** (Pancarta verde) ☐ **USO RESTRINGIDO** (Pancarta Amarilla) ☐ **INSEGURO** (Pancarta roja)

Identificar cualquier restricción de uso existente al igual que en la pancarta de marcación:

_____

_____

Futuras Acciones Poner check en cualquiera de las cajas que se enseñan a continuación en el caso de que sí se necesiten futuras acciones

☐ Uso de barricadas en las siguientes areas: _____

_____

☐ Recomienda Evaluación Detallada ☐ Estructural ☐ Geotécnia ☐ Otra: _____

☐ Otra recomendación: _____

Comentarios _____

_____

Figura 2. Formulario de Evaluación Rápida de Estructuras Post-Evento.
Fuente: Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras NEC (2015).

Finalmente, el formulario permite asignar un cartel de seguridad al edificio, basado en los daños observados. Se concluye con un espacio para la firma del evaluador y la fecha de la inspección, lo cual certifica la información registrada y valida la evaluación realizada.

SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN DE DAÑOS

El ATC-20-1 emplea un sistema de señalización con tres colores codificados, similar a un semáforo, para indicar el nivel de seguridad del edificio: Inspeccionado (Verde), Uso Restringido (Amarillo) e Inseguro (Rojo) (ver Fig. 3).

Cartel "Inspeccionado" (Verde): Indica que el edificio ha sido evaluado y se considera seguro para su ocupación. No hay restricciones adicionales y se puede utilizar normalmente, aunque debe continuar con monitoreo regular.

Cartel "Uso Restringido" (Amarillo): Señala que el edificio presenta daños que limitan su uso y requiere una inspección más detallada. Se deben imponer restricciones en su uso y tomar precauciones adicionales hasta que se realice una evaluación exhaustiva.

Cartel "Inseguro" (Rojo): Indica que el edificio tiene daños graves que comprometen su seguridad. El edificio debe ser evacuado y cerrado, y eventualmente demolido.

Este sistema de carteles permite una comunicación clara y rápida sobre el estado del edificio, facilitando la comprensión inmediata de su condición por parte de propietarios, inquilinos y el público en general. La señalización adecuada es crucial para garantizar la seguridad de las personas y para informar sobre el uso permitido del edificio en función del daño estructural detectado.



Figura 3. Carteles de inspección.
Fuente: Guía Práctica para Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras (NEC 2015).

CONCLUSIONES

Las metodologías de inspección visual rápida de edificios desarrolladas por FEMA P-154 y ATC-20-1 establecen un punto de partida esencial para evaluar la vulnerabilidad estructural antes y después de eventos sísmicos. Estas metodologías permiten identificar elementos estructurales y no estructurales que pueden comprometer la seguridad de los ocupantes y del público en general. La estructura sistemática de los formularios facilita evaluaciones ágiles y efectivas, proporcionando a las autoridades datos cruciales para tomar decisiones rápidas y mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias sísmicas.

Para adaptar estos procedimientos en Argentina, se debería seguir un proceso estructurado. Primero, es fundamental realizar un análisis exhaustivo del contexto local, incluyendo la normativa existente, las características de construcción predominantes y

las condiciones sísmicas. A continuación, se debe adaptar el contenido de los formularios y procedimientos para reflejar las prácticas y materiales de construcción locales y los niveles de riesgo aceptables. Este proceso debe involucrar a expertos en ingeniería sísmica, autoridades locales y profesionales del sector de la construcción para asegurar que los métodos sean relevantes y efectivos en el contexto específico.

También es crucial llevar a cabo una capacitación extensiva para los inspectores y personal involucrado en la implementación de estos procedimientos. La formación debe enfocarse en la correcta aplicación de los formularios, la identificación de daños y la interpretación de resultados. Además, se debe establecer un sistema de revisión y actualización continua para asegurar que los procedimientos se mantengan alineados con los avances en la tecnología y las mejores prácticas internacionales.

Una parte importante del proceso de adopción es realizar estudios comparativos entre distintas metodologías de evaluación visual rápida para analizar su fiabilidad y eficacia. Estos estudios deberían evaluar la precisión, consistencia y eficacia de los procedimientos en diferentes contextos y tipos de edificaciones. También se deberían comparar los resultados obtenidos con las metodologías de nivel 1 con las evaluaciones de nivel 2 o detalladas con cálculo estructural.

Los datos obtenidos a través de estas evaluaciones pueden servir como base para implementar programas de mitigación de riesgos en áreas sísmicamente vulnerables. Los formularios también permiten mantener un registro de las condiciones de los edificios, facilitando la identificación de los más críticos. Estas evaluaciones rápidas son una base sólida para investigaciones posteriores y la implementación de evaluaciones detalladas, realizadas por ingenieros estructurales especializados, para mejorar la seguridad de los edificios frente a sismos.

Algunas líneas emergentes de investigación son:

Integración de Tecnologías Avanzadas: Evaluar cómo tecnologías emergentes, tales como drones o sensores avanzados, pueden mejorar la precisión y eficiencia de las evaluaciones rápidas.

Desarrollo de Métodos Predictivos: Investigar métodos para predecir el comportamiento estructural durante y después de un sismo, basados en los datos de las evaluaciones rápidas.

Optimización de Protocolos: Mejorar los formularios y procedimientos para adaptarlos a diferentes tipos de edificaciones y condiciones sísmicas.

Capacitación y Protocolos de Inspección: Examinar la formación de inspectores y los protocolos para asegurar la consistencia y precisión en las evaluaciones.

Este enfoque integral ayudará a fortalecer la capacidad de respuesta frente a eventos sísmicos y contribuirá a la seguridad sísmica a nivel global.

REFERENCIAS

Alarcón Carvajal, D. F. (2023). Implementación del Manual Build Change para el diseño de reforzamiento sismorresistente en una vivienda localizada en Medellín. Neiva: Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil. Obtenido de https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/51373

Applied Technology Council-ATC. (2005). ATC-20-1 Building Safety Evaluation Forms and Placards. Redwood City, California: Applied Technology Council. Obtenido de https://www.atcouncil.org/atc-20

Applied Technology Council-ATC. (2015). FEMA P-154, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (Third Edition). Redwood City, California: Applied Technology Council-ATC. Obtenido de https://www.atcouncil.org/docman/fema/27-fema-p-154-full-report-508-2016

Applied Technology Council-ATC. (2015). FEMA P-155, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation (Third Edition). Redwood City, California: Applied Technology Council-ATC. Obtenido de https://www.atcouncil.org/docman/fema/28-fema-p-155-full-report-508-2016

Chimbo Bayas, R. D. (2020). Determinación De Un Método Simplificado Para La Inspección Estructural De Edificaciones De Concreto Reforzado. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo. Obtenido de http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6806

Goitia, F. (2023). Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico en La ciudad de Buenos Aires. UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. Obtenido de http://hdl.handle.net/2117/388690

Instituto Nacional de Prevención Sismica. (2023). Manual de Prevencion Sísmica. San Juan: INPRES. Obtenido de https://www.inpres.gob.ar/

Karapinar, S. I., & Özbay, Ö. A. (2022). A Comparative Assessment Of The Seismic Vulnerability Evaluation Methodologies For Reinforced Concrete Buildings. En Sustainability Of Natural Resources' Efficiency (pág. 152). Ankara/Turkey: GÜLDAL Serkan. Obtenido de https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2022/09/Sustainability-Of-Natural-Resources-Efficiency.pdf#page=98

kham, S. U., Qureshi, M. I., Rana, I. A., & Maqsoom, A. (2019). Seismic vulnerability assessment of building stock of Malakand (Pakistan) using FEMA P-154 method. SN Applied Sciences, 14. doi:https://doi.org/10.1007/s42452-019-168-z

Ministerio De Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI. (Septiembre de 2016). Guía práctica para evaluación sísmica y rehabilitación de estructuras de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015. Quito: Imprenta Activa. Obtenido de https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/

Morales Alarcón, Y. A. (2020). Metodología de inspección para clasificar y estandarizar daño sísmico en edificios habitacionales de hormigón armado con sistemas de muros. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177876

Wyser Adeva, P. (2019). Análisis de la vulnerabilidad sísmica en la arquitectura educacional moderna : aplicación del método FEMA a establecimientos desarrollados por la SCEE entre 1937-1965. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/172731

REMOCIÓN DE COBRE MEDIANTE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

Natalia A. Hidalgo[a], Luis A. Cañari[a], Melisa B. Rosa[b]y Ester N. Cano[a]

a. Instituto de Investigaciones Mineras, FI, UNSJ, Av. Libertador Oeste 1109, J5400ARL San Juan, Argentina
b. Instituto de Ciencias Básicas, FI, UNSJ, Av. Libertador Oeste 1109, J5400ARL San Juan, Argentina

e-mail: nhidalgo@unsj.edu.ar

RESUMEN

Un humedal es una zona inundada por agua superficial o subterránea, con una frecuencia, duración y profundidad capaz de mantener la vegetación adaptada a sustratos saturados y condiciones de estrés. En este sentido, los humedales artificiales son específicamente diseñados para tratar las aguas residuales y/o remoción de metales pesados. Esta técnica como parte de la biorremediación, ofrece beneficios ambientales como mejoramiento de la calidad ambiental, paisaje, creación de nichos ecológicos y zonas de amortiguamiento climáticas. Además, resultan económicamente más ventajosos que los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales. En el diseño del humedal se tiene en cuenta, por un lado, el tipo del medio poroso que se utiliza como soporte del mismo, utilizándose gravas de diferentes granulometrías. Y por el otro, la importancia de la especie vegetal que va a ser seleccionada para tal fin. Para el diseño del humedal se tuvieron en cuenta, el lecho poroso con diferentes granulometrías a las cuales previamente se les midió la porosidad. Luego se realizó una selección y periodo de adaptación de la especie vegetal seleccionada. Se procedió al cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH) y área superficial (A) como parte necesaria del dimensionamiento. Por último, se procedió a realizar una cinética y posterior cálculo de la eficiencia de remoción de cobre en porcentaje (%). El objetivo del presente trabajo fue diseñar un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para remoción de soluciones sintéticas de cobre. Para el armado del humedal se utilizó grava gruesa y fina y la especie vegetal seleccionada fue del género Zephyranthes de la familia Amaryllidaceae. El resultado obtenido fue de un 80 % de remoción del metal en un tiempo de retención (TRH) estipulado de 8 horas en función de las dimensiones del humedal.

Palabras Clave: Humedales, Remoción, Metales pesados, Tiempo de retención hidráulico.

INTRODUCCIÓN

Por humedal se entiende como una zona inundada por agua superficial o subterránea, con una frecuencia, duración y profundidad capaz de mantener vegetación adaptada a sustratos saturados y condiciones de estrés. En este sentido, los humedales artificiales son específicamente diseñados para tratar las aguas residuales (Llagas Chafloque W.A. and Gómez E.G., 2006).

Los humedales ofrecen beneficios ambientales como mejoramiento de la calidad ambiental, paisaje, creación de nichos ecológicos y zonas de amortiguamiento climáticas. Además, resultan económicamente más ventajosos que los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales (Bedoya Pérez et al., 2014).

Existen diferentes sistemas para clasificar a los humedales, sin embargo, todos ellos toman en consideración tres criterios: El tipo de vegetación presente, el tipo de flujo y la dirección del mismo.

Los sistemas de flujo subsuperficial se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado, y requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar los rendimientos esperados. Esto se logra en sistemas de tamaño pequeño a moderado (Kadlec et al., 1993), (Knight R.L., 1994). En el diseño del humedal se tiene en cuenta, por un lado, el tipo del medio poroso que se utiliza como soporte del mismo, utilizándose gravas de diferentes granulometrías. Y por el otro, la importancia de la especie vegetal que va a ser seleccionada para tal fin (Saeed T. and Sun G., 2012).

Los procesos de remoción en los humedales artificiales pueden ser del tipo físico, biológico y químico. Para el caso del proceso de remoción físico, los humedales artificiales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo, ya que este es con frecuencia laminar. Para el caso de la remoción biológica, es debido a la captación de estos como forma de nutrientes esenciales tales como: nitrógeno, nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. La remoción química se da en los suelos del humedal debido a la adsorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

El objetivo del presente trabajo fue diseñar un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para remoción de soluciones sintéticas de cobre.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El humedal consta de un recipiente de vidrio rectangular completamente sellado de 17 cm de largo y 31 cm de ancho, con un volumen de 9.8 litros aproximadamente. Se colocaron en ambos extremos del humedal llaves de paso para permitir la entrada y salida de solución de cobre.

El diseño y construcción del humedal consta de varias etapas como se puede ver a continuación.

-Determinación del lecho del humedal y medición de la porosidad de la grava gruesa y fina.

Para el caso del armado del lecho del humedal, se utilizó grava de diferentes tamaños. La grava fina utilizada fue de un tamaño entre 3-35 mm, mientras la grava gruesa fue de 33-128 mm Medición de porosidad de las gravas: el método utilizado según la norma NLT-153/63- Método para la determinación del peso específico y la absorción de los áridos grueso.

-Selección y periodo de adaptación de la especie vegetal.

La elección de la planta se realizó debido a que crece en suelos con presencia de agua abundante o en maceta con drenaje reducido. La misma se propaga fácilmente por bulbos, propicio en procesos de fitorremediación. Este género se lo ha utilizado para recuperar suelos post-fuego y para la remoción de sitios contaminados con metales pesados (Yuan et al., 2016). Para el periodo de adaptación, inicialmente el humedal fue alimentado con agua

potable durante un tiempo de dos meses. Posteriormente se hizo circular la solución de cobre dos veces evitando de esta manera la menor dilución del metal.

Cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH) y el área superficial (As).

A continuación, se evidencia las ecuaciones que permitieron obtener los parámetros mediante las siguientes ecuaciones, ver Ec. (1) y Ec. (2) (Pérez Reyes et al., 2017).

$$TRH = \frac{\mathrm{n} * \mathrm{L} * \mathrm{W} * \mathrm{d}}{\mathrm{Q}} \quad (1)$$

$$As = L * W \quad (2)$$

Dónde:

TRH = tiempo de retención hidráulica (d)

n = porosidad efectiva (%)

L = longitud (m)

W = ancho (m)

d = promedio de profundidad del agua (m)

Q= caudal promedio (m^3/d)

Para calcular área superficial (As), se selecciona una relación L:W.

-*Preparación de la solución sintética de cobre.*

Se utilizó sulfato de cobre pentahidratado como solución sintética, preparada a una concentración de 25 ppm. Para la preparación de la solución metálica, se trabajó con solución madre de 100 ppm, a partir de la cuales se hicieron diluciones a 25 ppm.

-*Cinética de remoción de cobre:*

Al finalizar la fase de adaptación se descargó por completo la solución metálica al humedal. Se tomaron muestras al tiempo de retención calculado y además a las 24 horas y a la semana (168 horas) después de haber colocado. El humedal fue alimentado con un caudal estático de aproximadamente de 0,875 l/h. Donde se ocupó un volumen de llenado de 6,5 litros del total.

-*Cálculo de porcentaje de remoción de cobre*

Mediante la siguiente ecuación, ver Ec. (3).

$$E = \frac{(Ci - Cf)}{Ci} * 100 \quad (3)$$

Dónde:

E= eficiencia de remoción de cobre (%).

Ci= concentración inicial de solución de cobre a la entrada del humedal.

Cf= concentración final de solución de cobre a la salida del humedal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

-Como resultado de la porosidad (expresada en porcentaje) de las gravas se obtuvo:

- Grava gruesa: 1,42%
- Grava fina: 2,87%

SS-La especie vegetal seleccionada fue del género *Zephyranthes* de la familia *Amaryllidaceae*. A continuación, se muestran imágenes del humedal en la Fig. 1. En la Fig. 2 se muestran imágenes de la especie vegetal.



Figura 1. Imágenes de los humedales.



Figura 2. Especie vegetal seleccionada del género *Zephyranthes*.

-A continuación, se evidencia los valores obtenidos del tiempo de retención hidráulica

(TRH) y el área superficial (As).

- TRH= 8 horas
- As= 527 cm^2

-Resultados de remoción de la solución de cobre, ver Tabla I.

Tabla I. Porcentaje de remoción de cobre a diferentes tiempos.

Tiempo en Horas (hs)	Cf (ppm)	Remoción de Cu en (%)
8	67,68	60,16
24	45	78
48	30,17	84,91
72	29,45	85,27
144	27	86

La especie seleccionada *Iris pseudacorus* demostró tener una buena adaptación al lecho formado solo por grava (ausencia de tierra) y también a las condiciones ambientales externas (humedad aproximada del 37% y temperaturas invernales de entre 10 a 19ºC). El lecho solo formado por grava gruesa y fina demostró en este trabajo ser eficaz en cuanto al crecimiento y sostén de la planta. Los medios filtrantes deben ser inertes y poseer condiciones que no aporten nutrientes, color o cambios en los parámetros fisicoquímicos de las aguas tratadas. Como resultado de la cinética de remoción de cobre, se obtuvo en el humedal a las 8 horas de contacto (tiempo de retención calculado) un valor del 60 %, incrementándose este valor a las 24 y a las 48 horas y estabilizándose ese valor en los siguientes tiempos. En este caso, se obtuvo valores de remoción promedio del 80%. Las causas pueden ser diversas, entre ellas es que los humedales funcionan interactuando en forma conjunta en la captación del metal, tanto la planta, la grava, los microorganismos y no menor las condiciones ambientales que favorecen la degradación del metal. Esta remoción en la bibliografía se traduce como remoción tanto física, química y biológica. Los valores obtenidos son comparables a los consultados en bibliografía donde obtuvieron un tiempo de retención de 13 horas para un área de humedal de 0,651 m^2.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo demuestran que es posible implementar la tecnología de humedales artificiales subsuperficiales horizontales para el tratamiento de aguas contaminadas con cobre, de forma económica y ambientalmente responsable. Este estudio proporciona datos valiosos sobre el diseño preliminar de un humedal artificial y el género de plantas ideales que se pueden considerar para remediar aguas contaminadas. Los objetivos de futuros trabajos es el diseño de otro tipo de humedal, con el uso de otras especies de plantas.

REFERENCIAS

Bedoya Pérez J. C., Ardilla Arias A. N y Reyes Calle J. Evaluación de un humedal artificial de

flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitario Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Rev. Int. Contam. Ambe*. 30 (3), 275-283 (2014).

Kadlec R. H., Bastiacens W., and Urban D. T. Hidrological desing of free wáter Surface treatment wetlands. In G. Moshiri (ED). Constructed wetlands for wáter quality improvement; *Lewis Publishers, Chelsea, MI*. 77-86 (1993).

Knight Robert L. Treatment wetlands data base now available. Water environment and technology for wáter quality treatment, U.S. environmental protection agency, risk reduction environmental laboratory; Cincinnati, OH. 6 (2), 31-33 (1994).

Llagas Chafloque W. A., Gómez E. G. A desing of an artificial marsh for treating waste wáter in the UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones*. 15 (17), 85-96 (2006).

Pérez Reyes G., Enciso Saenz S., Del Prado M. y Castañon Gonzales J. *Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio*. Tesis de postgrado, Instituto Tecnológico de Tuxtla

Gutiérrez, Chiapas, México. (2017). Saeed T., and Sun G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *J. Environ. Manag*. 112, 429-448 (2012).

Yuan Y., Yu S., Bañuelos G. S. and He Y. Accumulation of Cr, Cd, Pb, Cu and Zn by plants in tanning sludge storage sites: opportunities for contamination bioindication and phytoremediation. *Environ Sci Pollut Res*. 23, 22477-22487 (2016).

ESTUDIOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS – GEOELÉCTRICOS APLICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LENTES DE AGUA DULCE EN AMBIENTES INTERMAREALES

María Paula Leal [a], Santiago Perdomo [c] y Eleonora Carol [a, b]

[a] *Centro de Investigaciones Geológicas, CONICET-UNLP, ARGENTINA*
[b] *Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, ARGENTINA*
[c] *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, ARGENTINA*

e-mail: mpleal@cig.museo.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los ambientes intermareales asociados a la migración de crestas de playa constituyen entornos hidrogeológicos muy cambiantes, en donde las variaciones de salinidad en el agua subterránea son complejas y responden generalmente a cambios laterales en las características geomorfológicas – litológicas. El objetivo del trabajo fue realizar estudios hidrogeomorfológicos y geoeléctricos aplicados a la evaluación de la distribución de lentes de agua dulce en ambientes intermareales localizados en el litoral sur de Bahía Samborombón. Para ello, se realizó una descripción de las características geomorfológicas a partir del análisis de imágenes satelitales y relevamientos de campo. Asimismo, en campo se describió la litología de los sedimentos, se efectuaron tomografías eléctricas y se midió la profundidad del nivel freático y la conductividad eléctrica del agua subterránea. Los resultados obtenidos muestran que el área se caracteriza por una alternancia de depósitos arenosos de crestas de playa y depósitos areno-limosos de planicies intermareales. En las tomografías eléctricas puede observarse una zona resistiva (60 a 160 Ohm m) que coincide con el desarrollo de lentes de agua dulce, las cuales ocurren en coincidencia con las crestas de playa. Se pudo comprobar que dichas zonas son delgadas con espesores cercanos a 3 m, esperables para las crestas de playa de escasa dimensión como las analizadas. Estos resultados ponen en evidencia el control hidrogeomorfológico sobre la infiltración del agua de lluvia y el desarrollo de lentes de agua dulce, constituyendo una herramienta para la prospección de este tipo de lentes en ambientes intermareales.

Palabras Clave: Hidrogeomorfología, Geoeléctica, Lentes de agua dulce, Interfase agua dulce – agua salina.

INTRODUCCIÓN

Los ambientes litorales asociados a la migración de crestas de playa constituyen entornos hidrogeológicos muy variables en donde las variaciones de salinidad en el agua subterránea son complejas y responden generalmente a cambios laterales en las características geomorfológicas – litológicas. Esto se debe a que los depósitos de crestas de playa arenosas tienden a estar asociados lateralmente a depósitos de planicies intermareales compuestos por arcillas y limos. Lo cual, determina que dentro del

ambiente costero existan variaciones en la permeabilidad de los sedimentos lo que da lugar a un comportamiento hidrogeológico diferencial. En las crestas de playa compuestas por material arenoso más permeable, se favorece la infiltración del agua de lluvia y su acumulación como lentes de agua subterránea dulce. Por su parte, en las planicies intermareales con sedimentos de baja permeabilidad, el agua de lluvia tiende a acumularse en superficie y/o drenar, permaneciendo subterráneamente el agua salina mareal (Bear, 2012, Carol, et al.; 2022; Tanjal et al., 2023). Ambientes de este tipo se desarrollan en el litoral sur de Bahía Samborombón, provincia de Buenos Aires. En este sector, el abastecimiento de agua dulce para el consumo humano es uno de los principales problemas para el desarrollo socioeconómico, siendo estas lentes la principal o única fuente de agua dulce en la región (Carol, 2022). La aplicación de la prospección geofísica contribuye a conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y su naturaleza. Los métodos eléctricos aplicados en hidrogeología sirven para determinar la existencia y distribución aproximada del agua en terrenos permeables (Perdomo et al., 2013), siendo la tomografía eléctrica (ERT) una herramienta muy eficaz para las investigaciones de interfaces de agua dulce-salada en entornos costeros (Albuquerque et al., 2022). Es por ello que, se definió como objetivo del presente trabajo, realizar estudios hidrogeomorfológicos y geoeléctricos aplicados a la evaluación de la distribución de lentes de agua dulce en ambientes geomorfológicos litorales localizados en el sector costero sur de Bahía Samborombón (Fig. 1).

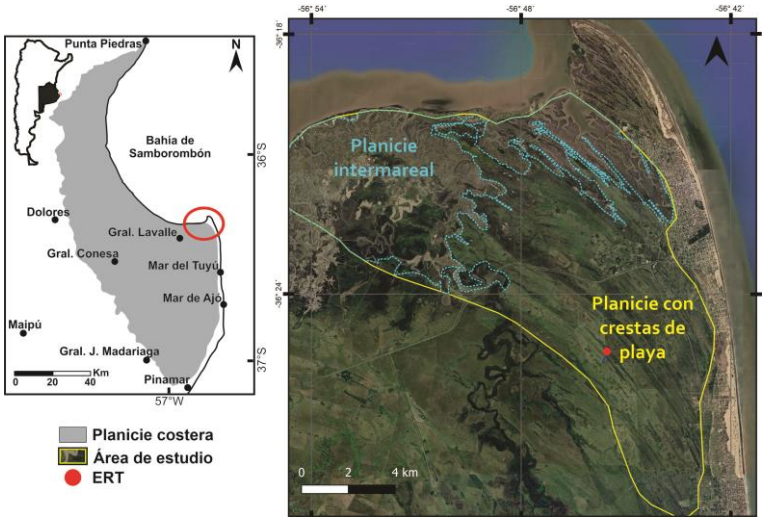


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

METODOLOGÍA

Se realizó una descripción de las características geomorfológicas del área de estudio, a partir del análisis de imágenes satelitales multiespectrales de resolución espacial media (Sentinel – 2, Copernicus 2022 - ESA), visualizaciones mediante Google Earth (Image © 2023 CNES/Airbus en Google Earth™) y relevamientos de campo.

Las geoformas de interés para este trabajo fueron las cestas de playa, por ello se definió la traza de las tomografías eléctricas en sentido perpendicular a las mismas. Las tomografías se realizaron con el equipo ARES II (*GF instruments*). La ERT de ejemplo, tuvo una extensión de 240 m, contó con una separación entre electrodos de 2,5 m y un

arreglo Dipolo-Dipolo. Mediante el software *Res2DInv* los valores medidos de resistividad aparente se procesaron para obtener un modelo de resistividades verdaderas en dos dimensiones, en forma de perfil o Imagen de Resistividad Eléctrica (IRE) (Loke, 2004; Perdomo et al., 2013), con RMS de 5 y se contempló un error del 6,5%. A su vez, se efectuaron sondeos en la misma traza del perfil, de los cuales se extrajeron muestras de agua subterránea y sedimentos. *In situ* se midió la profundidad del nivel freático y la conductividad eléctrica (CE) del agua con equipo multiparamétrico portátil (Lutron® WA-2017SD). Asimismo, se describió la litología de los sedimentos.

Con el fin de determinar la fracción predominante, en el laboratorio del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG, CONICET-UNLP) de la ciudad de La Plata, se realizó el análisis granulométrico a través del método de tamizado, en función la clasificación granulométrica de Udden (1914) y Wentworth (1922). El material disgregado de cada muestra, previamente cuarteada para su representatividad, fue volcado en un conjunto de tamices representativos de cada granulometría; y, durante 10 a 15 minutos las distintas fracciones fueron separadas mecánicamente a través de una rot up (marca Retsch). El material retenido en cada tamiz fue pesado en balanza analítica con precisión de 0,01 g para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla. Estos datos se plotearon en un triángulo de texturas de suelo de la USDA (United States Department of Agruculture, Departamento de agricultura de Estados Unidos) que, a su vez, se correlacionó con la tasa de infiltración.

RESULTADOS

El análisis de imágenes satelitales y relevamientos de campo permitieron distinguir en el área de estudio una alternancia de depósitos de crestas de playa y de planicie de mareas. Estos últimos se conectan a la Bahía Samborombón a través de canales de marea por los que se propaga el flujo mareal, existiendo hacia los sectores más continentales canales de marea actualmente desconectados del ciclo mareal (Fig. 1 y 2 B, C, E a G). Por otra parte, las crestas de playa constituyen geoformas topográficamente positivas, elongadas en dirección noroeste-sureste separadas entre sí por zonas deprimidas. Hacia el sector norte las crestas de playa son angostas y se encuentran interceptadas por los canales de marea activos. Hacia el sector sur las zonas deprimidas pierden conexión mareal y las crestas de playa presentan mayor extensión transversal. Entre estos dos sectores se distingue un sector central o transicional, en el cual ambos tipos de crestas se ven modificadas por la acción antrópica, por caminos, sectores rurales y residenciales (Fig. 1 y 2 A y D). Las muestras de sedimentos analizadas en el presente trabajo, tanto las pertenecientes a las crestas como a los bajos, dieron como resultado textura arenosa con altas tasas de infiltración (mayor a 12, 16 cm/h) (Fig. 3).

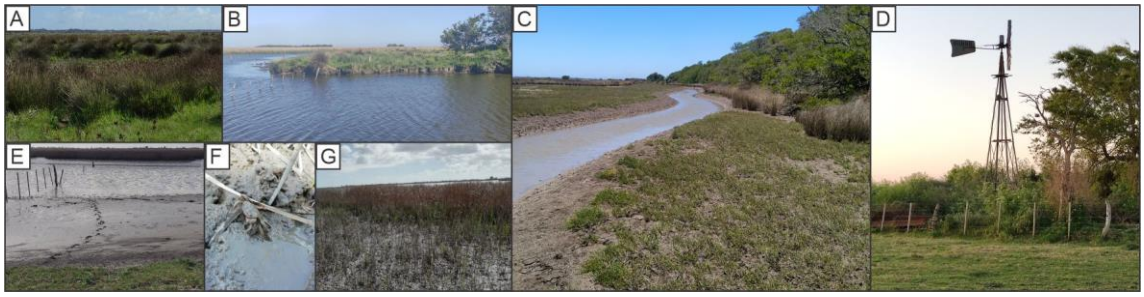


Figura 2. Fotografías de cada geoforma y ambiente. A) Cresta de playa; B) Canal de marea; C) canal de marea y cangrejal; D) cresta de playa y molino; E) canal de marea; F y G) cangrejal.

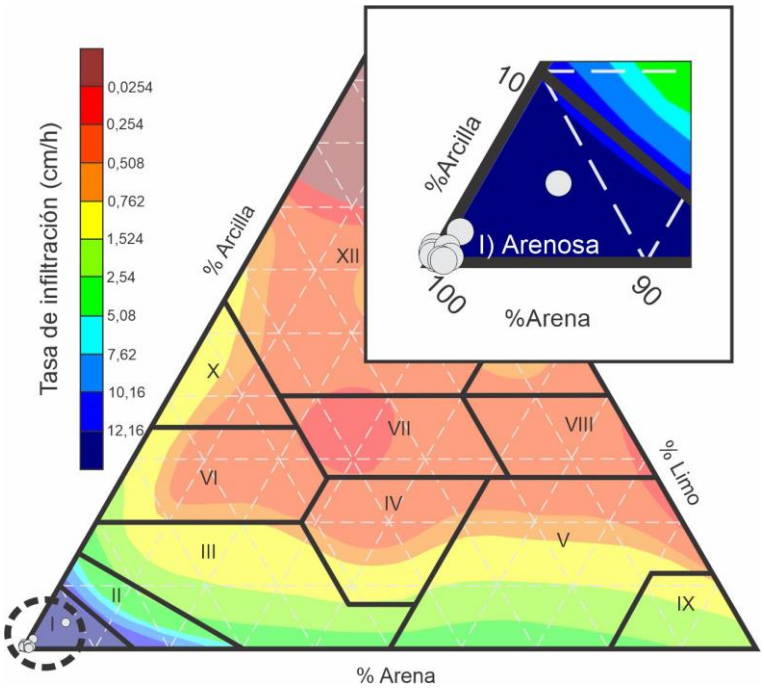


Figura 3. Triángulo textural de suelos y tasas de infiltración.

En las tomografías eléctricas puede observarse una zona resistiva (60 a 160 Ohm m) que coincide con el desarrollo de lentes de agua dulce, las cuales ocurren en coincidencia con las crestas de playa. Estas lentes de agua dulce son delgadas registrándose espesores cercanos a 3 m.

En el caso de la ERT ejemplo, se observó una zona con alta resistividad asociada al desarrollo de la cresta de playa con una lente de agua dulce. Las muestras de agua presentaron CE de 1,235 y 1,397 mS/cm (muestras T1A y T1E); en contraste con un sector de baja resistividad, con un valor de conductividad eléctrica de agua salina (muestra T1C), asociado a un bajo intercrestal. Se observó una zona transicional, definida como el límite entre cresta e intercresta (muestra T1D) con agua de tipo salobre (Tabla I y Fig. 4).

Tabla I. Datos de profundidad del nivel freático (p.n.f.), conductividad eléctrica en agua (CE) y tipo de agua por pozo.

Muestra	p.n.f. (m)	CE (mS/cm)	Tipo de agua
T1A	2	1,235	Dulce
T1B	0,8	5,39	Salobre
T1C	1,5	17,5	Salina
T1D	1,5	4,04	Salobre
T1E	1,8	1,397	Dulce

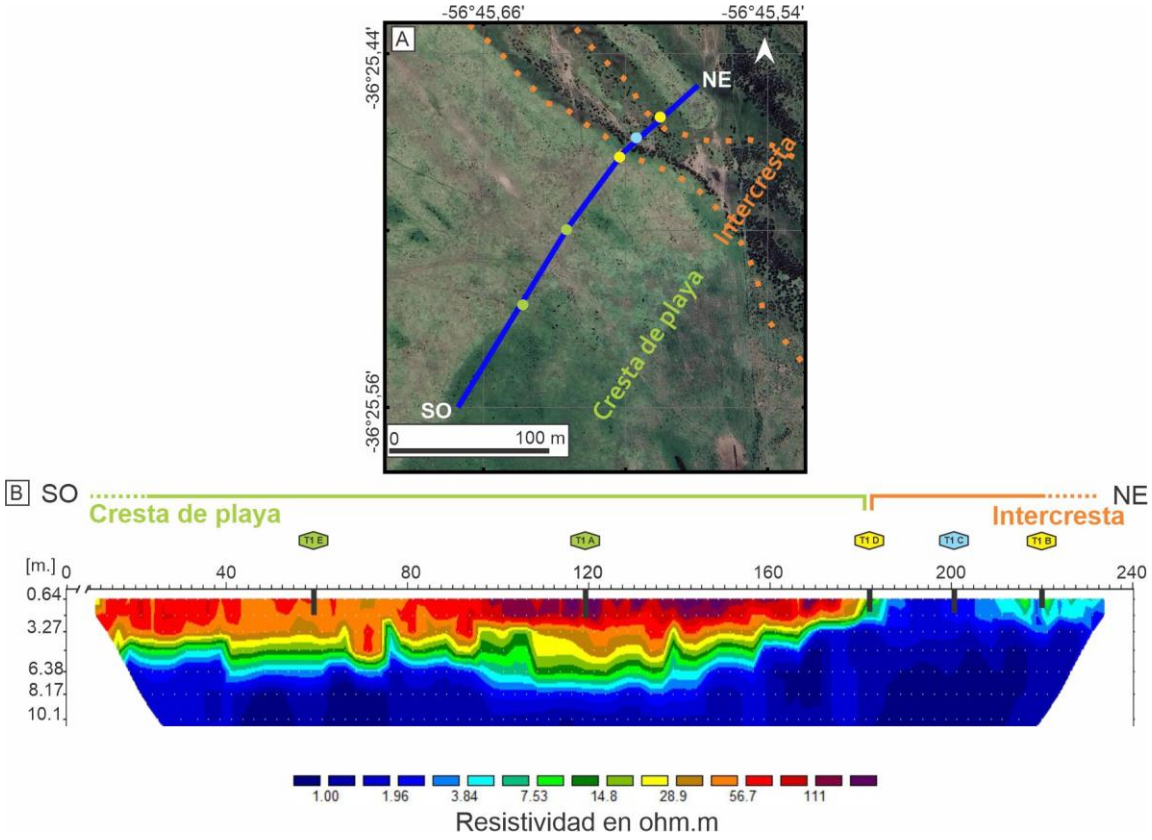


Figura 4. A) Vista en planta de traza de tomografía eléctrica ejemplo (ubicación en Fig. 1). B) Perfil de resistividad eléctrica de tomografía eléctrica ejemplo.

CONCLUSIONES

Los estudios hidrogeomorfológicos y geoeléctricos desarrollados permitieron evaluar la distribución de lentes de agua dulce en ambientes litorales de Bahía Samborombón en donde coexisten depósitos de crestas de playa y de planicies intermareales.

Respecto a los primeros estudios mencionados se observó que, si bien la litología de ambos depósitos en el área de estudio es de tipo arenosa con tasas de infiltración altas, la morfología resulta ser el factor que condiciona la infiltración del agua de lluvia, que

da lugar a la formación de lentes de agua dulce. De esta manera, las crestas de playa con topografías positivas son los ambientes geomorfológicos que propician la generación de lentes de agua dulce, mientras que en las zonas deprimidas el agua subterránea tiende a ser salobre a salina. Este control hidrogeomorfológico se observa claramente en las tomografías eléctricas, las cuales permiten evaluar la morfología de las lentes de agua dulce en profundidad. En este sentido, los mayores espesores de las lentes de agua dulce se encuentran en las zonas más elevadas de las crestas de playa, registrándose un acuñamiento hacia los sectores deprimidos.

Se concluye que los estudios hidrogeomorfológicos y geofísicos constituyen metodologías de exploración complementarias, siendo los primeros importantes en la exploración regional de posibles fuentes de agua dulce, y los segundos adquiriendo relevancia en la confirmación y valoración de los espesores de dichas fuentes. Los datos aportados contribuyen a la exploración de recursos hídricos potables en zonas donde el abastecimiento de agua resulta una problemática en el desarrollo poblacional.

REFERENCIAS

Albuquerque, G. M., Mansur, K. L., Silva, G. C., Mello, C. L., & Braga, M. A. Fault mapping and characterization of a coastal aquifer related to a mangrove ecosystem, using electrical resistivity tomography (ERT), ground penetrating radar (GPR) and hydrochemical data: the case of the Mangue de Pedra Aquifer, Armação dos Búzios, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 120, 104095 (2022).

Bear, J. Hydraulics of groundwater. Courier Corporation (2012).

Carol, E., Cellone, F., Tanjal, C., & Galliari, M. J. Role of the geologic-geomorphic setting of the Río de la Plata estuary coastal landscape in controlling freshwater lenses shape and distribution. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103832 (2022).

Loke, M. H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (2004).

Perdomo, S., Carretero, S. C., Kruse, E. E., & Ainchil, J. E. Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Prov. Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos. *Actas del VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea* (2013).

Tanjal, C., Borzi, G., Santucci, L., Carol, E., & Richiano, S. Assessment of cation exchange as conditioning processes of water chemistry in freshwater lenses. *Water Environment* Research, 95(3), e10845 (2023).

Udden, J. A. Mechanical composition of clastic sediments. Bulletin of the geological society of America, 25(1), 655-744 (1914).

Wentworth, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), 377-392 (1922).

VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE EVENTOS COMPUESTOS CÁLIDOS Y HÚMEDOS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Agustina Lopez Ramirez[a], Mariana Barrucand[a,b], Soledad Collazo[a,c]

[a]*Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA*
[c]*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, ESPAÑA*

e-mail: alopez@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se propone estudiar la variabilidad espacio-temporal observada de extremos muy cálidos y húmedos durante el semestre cálido (de octubre a marzo) en el sur de Sudamérica. A partir de los datos diarios de temperatura máxima y precipitación de 132 estaciones meteorológicas en el periodo 1979-2018, se definieron los extremos compuestos como la ocurrencia simultánea o secuencial de extremos cálidos de temperatura y excesos de precipitación. Los extremos de temperatura fueron determinados como periodos en los que la temperatura máxima supera el percentil 90 durante al menos 3 días consecutivos y los excesos de precipitación fueron definidos a partir del índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) para 1 y 3 meses. Los resultados demostraron que los eventos compuestos fueron más frecuentes en el centro-este de Argentina, parte de Uruguay, centro de Chile y en la Patagonia oeste para los casos secuenciales. Para los casos simultáneos, las máximas frecuencias se encontraron en el centro de Argentina, aunque fueron relativamente menores que las frecuencias para los casos secuenciales. Los eventos compuestos cálidos y húmedos fueron más frecuentes en las décadas recientes, alcanzando también una mayor extensión espacial. Esto se observó tanto en los casos simultáneos como en los secuenciales. Si bien no se registraron cambios en la intensidad de las olas de calor de los eventos compuestos, se evidenció una tendencia significativa hacia el aumento de los días afectados por la ola de calor de ambos eventos y a una mayor duración de los casos simultáneos.

Palabras Clave: Ola de calor, humedad, SPI, Extremos.

INTRODUCCIÓN

Los eventos climáticos extremos son el producto de interacciones complejas entre procesos físicos a través de múltiples escalas espaciales y temporales (Zscheischler et al., 2018). Usualmente, la ocurrencia de este tipo de eventos supera la capacidad de los ecosistemas y la sociedad para afrontarlos, generando impactos significativos en la salud, en los sistemas socioeconómicos, en la agricultura y en entornos naturales.

Cuando se combinan dos o más eventos, sean o no extremos en sí, pueden amplificar significativamente los impactos asociados (Seneviratne et al., 2012; Leonard et al., 2014). Los eventos compuestos hidrometeorológicos, tales como la combinación de temperaturas extremas con precipitaciones intensas, son uno de los eventos más intensos y peligrosos en términos de los daños e impactos que son capaces de generar (Hao et al., 2018; Li et al., 2020).

Hasta el momento, gran parte de la literatura científica se ha basado en el estudio de eventos extremos que involucran un único proceso o variable; sin embargo, en los últimos años, ha surgido una notable motivación para el estudio de la concurrencia de dos o más eventos en vista de los riesgos e impactos amplificados que son capaces de generar. En Sudamérica, Tencer et al. 2016 demostraron que, durante la estación cálida (marzo a abril), las precipitaciones intensas en el este de Argentina se dan con mayor frecuencia de forma simultánea o posterior a un día muy cálido, pero raramente se desarrollan en forma previa. En cambio, los días fríos ocurren más frecuentemente luego de un evento de precipitación intensa. Años más tarde, Olmo et al. 2020 mostraron que los eventos compuestos de precipitación intensa y temperatura extrema (noches cálidas y días fríos) fueron los más frecuentes durante el periodo 1979-2015 particularmente en el sur de Chile y en el noreste de Sudamérica.

Teniendo en cuenta que las condiciones extremadamente cálidas y los eventos de precipitación intensa están siendo cada vez más frecuentes en el sur de Sudamérica, es necesario desarrollar una caracterización integral de estos eventos en la región. Tomando esto como premisa, este trabajo propone caracterizar la variabilidad espacio-temporal observada de extremos muy cálidos (olas de calor) y húmedos durante el semestre cálido (de octubre a marzo) en el sur de Sudamérica en base a las observaciones de estaciones meteorológicas.

DATOS Y MÉTODOS

En este estudio, se utilizaron los datos diarios de temperatura máxima y precipitación provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas en el sur de Sudamérica (entre 15ºS-60ºS y 45ºO-80ºO) durante el semestre cálido a lo largo del periodo 1979-2018. Después de realizar un control de calidad para detectar posibles errores, valores atípicos u otras inconsistencias en las series de datos, se seleccionó un total de 132 estaciones meteorológicas.

Se definieron los extremos compuestos como la ocurrencia simultánea o secuencial de olas de calor y excesos de precipitación. Las olas de calor fueron definidas como periodos en los que la temperatura máxima supera el percentil 90 (calculado en base al periodo 1981-2010 con una ventana móvil de 15 días) durante al menos 3 días consecutivos. Los excesos de precipitación se determinaron a partir del índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) para 1 y 3 meses. El SPI es un índice comúnmente utilizado en estudios climatológicos para evaluar y cuantificar las condiciones de sequía o exceso de humedad en una determinada área geográfica y período de tiempo. Se calcula en varias escalas temporales, como 1, 3, 6, 12 meses, etc., y sus valores se agrupan en categorías para definir las sequías y excesos de humedad. Un SPI > 1 indica condiciones severamente húmedas.

En este trabajo, un evento simultáneo será una ola de calor acompañada por un SPI1 > 1 y un SPI3 > 1. Ambos SPI corresponden al valor del índice del mes en el que ocurre la ola de calor. De esta forma, se obtuvieron las olas de calor que ocurrieron simultáneamente con condiciones de humedad (ola de calor húmeda simultánea). Para los casos secuenciales se debieron tomar otras consideraciones para encontrar la definición más apropiada. La relación entre la precipitación y la temperatura es compleja y depende de una variedad de factores, incluidos el clima local, la temporada y la duración e intensidad de los eventos de precipitación. Usualmente, las precipitaciones excesivas

conllevan a un posterior descenso de la temperatura, inhabilitando el desarrollo de extremos cálidos. Esto genera que el número de extremos húmedos seguidos por extremos cálidos sea limitado. Es por esto que se optó por estudiar los eventos cálidos seguidos por eventos húmedos como eventos secuenciales en este trabajo. En particular, un evento secuencial será una ola de calor que se inicia en el mes i con $SPI1_{mes\ i} < 1$ y $SPI3_{mes\ i+2} > 1$. En otras palabras, SPI1 se corresponde con el valor del índice para el mismo mes en el que ocurre la ola de calor, mientras que el SPI3 se corresponde con el valor del índice para el segundo mes posterior al mes de la ola de calor. De esta manera se representa la condición húmeda posterior al evento cálido (evento secuencial cálido-húmedo). Por ejemplo, si la ola de calor ocurre en enero, se considerará el SPI1 de enero y el SPI3 de marzo. Así, se obtuvieron los eventos de olas de calor que precedieron a situaciones de exceso de precipitación.

Para abordar la variabilidad espacio-temporal de los eventos y los cambios en su frecuencia de ocurrencia, se dividió el período de estudio en dos subperíodos: uno más antiguo (1979-1998) y otro más reciente (1999-2018). Luego, se evaluaron los cambios en base a las diferencias en las frecuencias totales de eventos y en los días involucrados en una ola de calor húmeda (HWds) de ambos períodos. En particular, se identificaron las estaciones meteorológicas donde la frecuencia y HWds del periodo más reciente fueron inferiores a la mitad de las del periodo más antiguo, entre la mitad y el doble de las del período antiguo, y superior al doble de las del periodo antiguo.

Además, se analizaron las funciones de distribución empírica acumulada (ECDF) de la extensión espacial. La ECDF es una función que se ajusta directamente a los datos observados, proporcionando una representación visual de cómo se distribuyen en todo su rango de valores. En este trabajo, se empleó la ECDF para detectar diferencias en la extensión espacial, definida como la proporción de estaciones que experimentaron al menos un evento por semestre cálido, entre los dos subperíodos. Su significancia estadística se evaluó mediante un test de Kolmogorov-Smirnov.

Por último, se analizó la variación interanual del número de días de ola de calor húmeda, así como la intensidad, duración y extensión espacial de estos eventos. El número de días de ola de calor humeda se determinó como la suma de todos los días involucrados en un evento para cada verano; la duración se definió como la cantidad de días que perduró cada evento; y la intensidad se calculó como la diferencia entre la temperatura máxima del día de ola de calor y el percentil 90, promediada en todos los días del evento. Posteriormente, para cada semestre cálido, se calculó el promedio espacial del número de días de ola de calor húmeda considerando todas las estaciones meteorológicas de la región de estudio, así como también los promedios de la duración e intensidad de las mismas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 presenta las frecuencias absolutas de olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales durante el periodo 1979-2018, revelando algunos patrones distintivos en la ocurrencia de estos eventos en el sur de Sudamérica. En términos generales, se destaca que las olas de calor húmedas secuenciales presentan una mayor frecuencia en comparación con las olas de calor húmedas simultáneas en la región estudiada. Esto se observa principalmente en el este de la región de estudio. Sin embargo, tanto en el noroeste de Argentina como en el norte de Chile, se registra una baja frecuencia en ambos tipos de olas de calor húmedas (simultáneas y secuenciales)

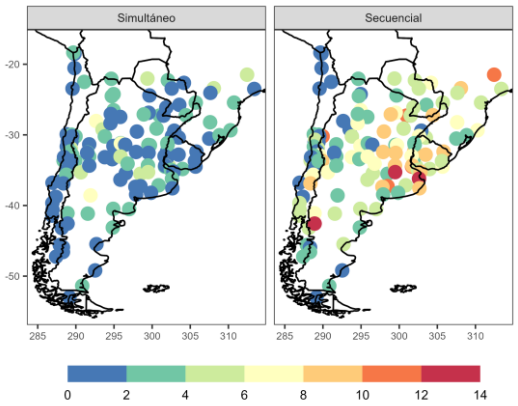


Figura 1. Frecuencias absolutas de olas de calor húmedas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.) en el periodo 1979-2018..

Se destaca la ocurrencia de hasta 14 eventos de olas de calor húmedas secuenciales en el periodo total en el centro-este de Argentina y Uruguay. Del mismo modo, en el centro de Chile, se observan estaciones con frecuencias absolutas de hasta 10 eventos en el mismo periodo. Este aumento en la frecuencia también se puede notar en una estación de la Patagonia oeste, donde se alcanza una frecuencia absoluta de entre 12 y 14 eventos.

La Figura 2 muestra las diferencias entre las frecuencias de olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales durante los períodos 1999-2018 y 1979-1998 en el sur de Sudamérica. Para los eventos simultáneos, se destacan diferencias positivas en el centro-norte de Argentina, norte de Chile y algunas estaciones de Brasil, indicando una ocurrencia de hasta 5 eventos más en el período más reciente. En estas zonas, las frecuencias del período reciente fueron más del doble que las del período antiguo. No

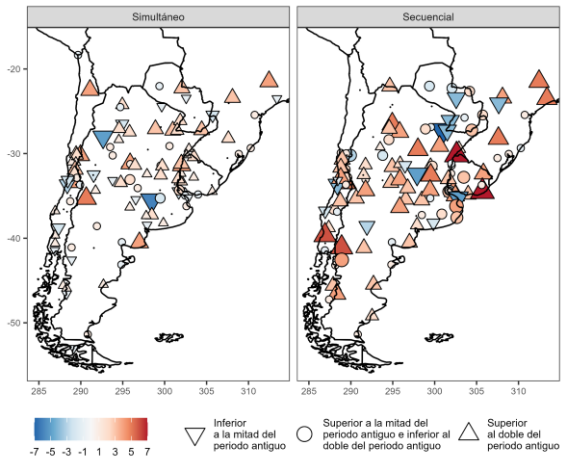


Figura 2. Diferencia entre las frecuencias del periodo 1999-2018 y las del periodo 1979-1998 de olas de calor húmedas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.). Se indican las estaciones en las que la frecuencia en el período reciente fue superior al doble que el período antiguo (triángulos hacia arriba) o inferior a la mitad (triángulos hacia abajo). El resto de los casos está indicado con círculos.

obstante, se observaron diferencias negativas en dos estaciones en el centro y noroeste de Argentina, donde la frecuencia del período más reciente fue inferior a la mitad del período antiguo. En Patagonia y el sur de Chile, las diferencias son cercanas a cero, lo que indica que no se registraron cambios notables en la frecuencia de ocurrencia en esta región.

Por otro lado, para las olas de calor húmedas secuenciales, se observan diferencias de mayor magnitud en comparación con los casos simultáneos. En gran parte de la región de estudio, especialmente en el sur de Chile, este de Argentina, Uruguay y Brasil, se registraron diferencias positivas, indicando un aumento en la ocurrencia de eventos. Algunas estaciones en estas regiones experimentaron al menos 5 eventos más en el período más reciente, superando el doble de la frecuencia del período antiguo. En contraste, en Paraguay y algunas estaciones adyacentes de Argentina y Brasil, se observan diferencias negativas. Las frecuencias del período reciente fueron menores que la mitad de las del período más antiguo, lo cual evidencia una disminución en la ocurrencia de eventos en esta región.

Las diferencias en los HWds observadas entre ambos períodos (figura 3) presentan un patrón similar al mostrado en la figura anterior. Para los casos simultáneos se observan diferencias positivas, superiores al doble del período antiguo, en numerosas estaciones del centro y noreste de la región estudiada. Solo dos estaciones ubicadas en el centro y noroeste Argentino registraron diferencias negativas significativas. Consistentemente con cambios en la frecuencia analizados anteriormente, las olas de calor húmedas secuenciales registraron un mayor número de HWds en el periodo más reciente en regiones como el centro y sur de Chile, el centro y este de Argentina, Uruguay y Brasil. Por el contrario, Paraguay presenta una disminución de HWds durante el periodo 1999-2018.

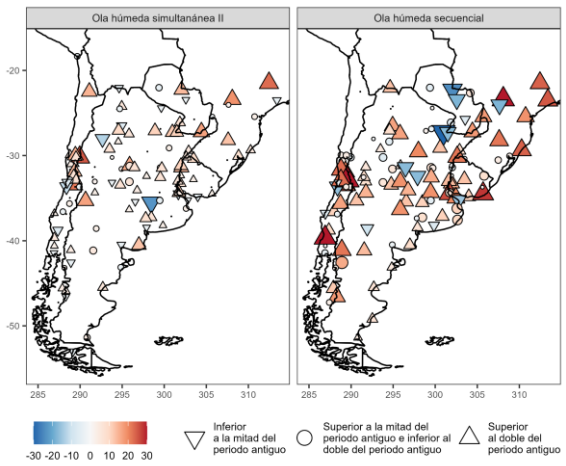


Figura 3. Idem figura 2 pero para los HWds.

En línea con lo anterior, se analizaron las ECDF de la extensión espacial de las olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales en el periodo antiguo y reciente con el fin de determinar diferencias en la extensión espacial de las olas de calor húmedas entre los dos periodos (Figura 4). La ECDF correspondiente a las olas del periodo más antiguo presentó un crecimiento más pronunciado, alcanzando el 100% de probabilidad acumulada en 0.1 (es decir, 10% de las estaciones meteorológicas) para los casos simultáneos y en 0.23 (23% de las estaciones meteorológicas) para los secuenciales. En contraste, la ECDF para

las olas del periodo más reciente muestra un crecimiento más gradual y alcanza valores más elevados de extensión espacial: 0.16 (16%) para los casos simultáneos y 0.25 (25%) para los secuenciales. Esto indica que, en el periodo más reciente, las olas de calor exhibieron una mayor extensión espacial en comparación con el periodo más antiguo, especialmente para las olas de calor húmedas secuenciales donde las diferencias resultaron estadísticamente significativas.

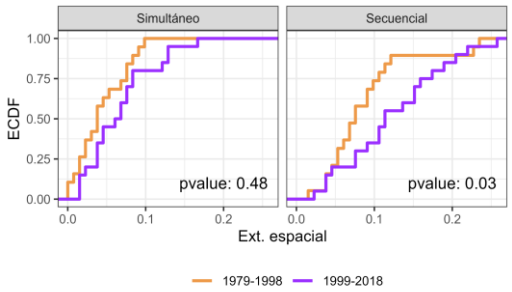


Figura 4. ECDF de la extensión espacial de las olas de calor húmedas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.). Se indican los p-valores del test de Kolmogorov-Smirnov entre distribuciones.

Finalmente, se exploró la variabilidad temporal de algunas características de las olas de calor húmedas mediante un análisis de los cambios interanuales. La Figura 4 proporciona las series anuales de HWds, duración media, intensidad media y extensión espacial de los eventos en el sur de Sudamérica.

El análisis muestra tendencias positivas y significativas en los HWds para ambos tipos de eventos (simultáneos y secuenciales), lo que indica un aumento en el número de días afectados por las olas de calor húmedas a lo largo del periodo estudiado. Además, se observa una tendencia positiva significativa en la duración de las olas de calor húmedas simultáneas, lo que sugiere que estas han sido más duraderas a lo largo del periodo. En promedio, las olas de calor tienen un día más de duración respecto a lo observado 40 años atrás. Sin embargo, no se registraron cambios significativos en su intensidad, la cual muestra una gran variabilidad interanual. En cuanto a las olas de calor húmedas secuenciales, no se encontraron cambios significativos en su duración e intensidad.

Por último, se evidencian tendencias positivas y significativas en la extensión espacial de las olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales indicando una expansión geográfica de estos eventos en el sur de Sudamérica. Es importante destacar que en los años 1981 y 1989 no se registraron olas de calor húmedas simultáneas, lo que se refleja en una caída a cero tanto en los HWds como en la extensión espacial durante esos años. En consecuencia, la duración e intensidad para esos años no pudieron ser estimadas debido a la ausencia de eventos en esos periodos.

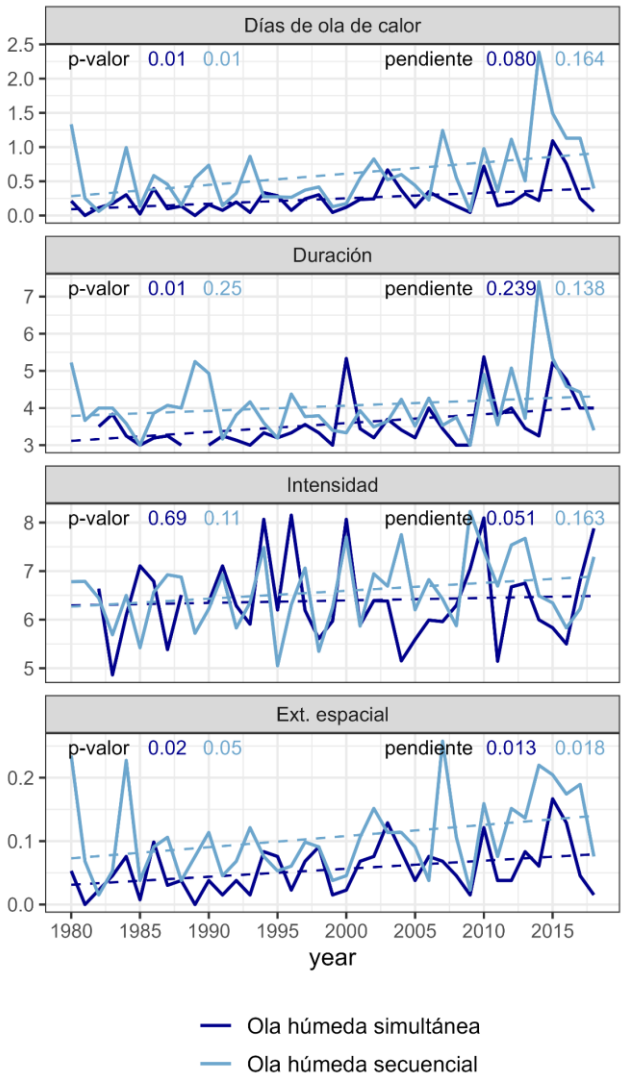


Figura 5. Series temporales de los días de ola de calor [días], duración [días], intensidad [ºC] y extensión espacial (expresado como la proporción de estaciones que registraron eventos) de las olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales. Se muestran los valores del p-valor del test de Mann-Kendall para la tendencia y el valor de la misma (expresada como la tasa de cambio de cada variable cada 10 años).

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las olas de calor húmedas del semestre cálido (octubre a marzo) en el sur de Sudamérica, explorando su variabilidad espacio-temporal a lo largo del periodo 1979-2018. En base a los datos de temperatura máxima y precipitación de 132 estaciones meteorológicas, se identificaron las olas de calor que estuvieron acompañadas (ola de calor húmeda simultánea) o seguidas (ola de calor húmeda secuencial) por excesos de precipitación.

En el sur de Sudamérica, las olas de calor húmedas secuenciales resultaron más frecuentes que las olas de calor que ocurren simultáneamente con excesos de precipitación. Esto puede ser debido a que las temperaturas altas cerca de la superficie favorecen el aumento en la cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera y la inestabilidad termodinámica que conduce a la actividad convectiva (Re and Barros, 2009). Esta actividad convectiva potencialmente puede generar eventos de precipitación localizados que terminan con los eventos de calor mediante un fuerte enfriamiento evaporativo (Wang et al., 2017).

Particularmente, el centro-este de Argentina y Uruguay muestra una alta frecuencia de olas de calor húmedas secuenciales, mientras que el norte de Chile y noroeste de Argentina muestra una baja ocurrencia de ambos eventos. Esto es consistente con trabajos previos que analizaron la ocurrencia conjunta de extremos de temperatura y precipitación, donde se demostró que la probabilidad de ocurrencia de precipitación intensa aumenta significativamente durante o después de una noche cálida, especialmente en el centro y noreste de Argentina y Uruguay (Tencer et al., 2016; Olmo et al., 2020). Este aumento de la frecuencia de eventos cálidos y húmedos también se ve favorecido por patrones de circulación atmosférica. Durante la estación cálida, una estructura dipolar de anomalías negativas de altura geopotencial a 500 hPa sobre el Océano Pacífico y anomalías positivas sobre el Océano Atlántico favorecen la intrusión de aire húmedo y cálido desde latitudes más bajas contribuyendo con la ocurrencia de extremos compuestos en el centro-este de Argentina y el noreste del sur de Sudamérica (Olmo et al., 2020).

La evaluación de la variabilidad temporal mediante la comparación de dos subperiodos (1979-1998 y 1999-2018) reveló un incremento en la ocurrencia de eventos y en el número de días involucrados en los mismos. En áreas como el centro-norte de Argentina, norte de Chile y algunas estaciones de Brasil, se observa un aumento considerable en la ocurrencia de eventos simultáneos, con hasta 5 eventos más en el período más reciente. Esto contrasta con algunas estaciones en el centro y noroeste de Argentina, donde se registró una disminución significativa en la frecuencia, pero eso solo ocurrió en solo 2 de las 132 estaciones analizadas. Por otro lado, las olas de calor húmedas secuenciales mostraron diferencias aún mayores, especialmente en el sur de Chile, este de Argentina, Uruguay y Brasil, con un incremento considerable en la ocurrencia de eventos. En estas regiones ocurrieron, como mínimo, 5 eventos más en el periodo reciente. En cuanto a los HWds, se demostró un incremento en el número de días afectados por las olas de calor a lo largo del período estudiado en varias regiones del sur de Sudamérica. Particularmente, se observó un aumento en el número de HWds para las olas secuenciales en el centro y sur de Chile, el centro y este de Argentina, Uruguay y Brasil, mientras que Paraguay experimentó una disminución.

Resulta interesante destacar que diversos estudios han demostrado que los extremos de temperatura y precipitación son cada vez más frecuentes en el sur de Sudamérica (Rusticucci and Barrucand, 2003; Rusticucci and Zazulie, 2021; Collazo et al., 2022; Re and Barros, 2009; Penalba and Robledo, 2010) y que estos incrementos en los extremos individuales pueden contribuir al aumento de eventos compuestos en la región. La literatura científica indica que los aumentos de calor dominan las tendencias en muchos eventos compuestos que involucran temperatura y otras variables (Gu et al., 2022; Yin et al., 2022). Recientemente, You et al. (2023) demostró que el incremento de extremos de calor en Sudamérica bajo un clima más cálido son los que han hecho que los eventos sucesivos de calor y humedad ocurran con más frecuencia en las últimas décadas.

Siguiendo en línea con el estudio de la variabilidad espacio-temporal de eventos compuestos en la región, se analizaron cambios en la extensión espacial de las olas de calor húmedas simultáneas y secuenciales a través de funciones de distribución empírica acumulada. El crecimiento gradual de la probabilidad acumulada del periodo reciente demostró un aumento en la extensión espacial de los eventos, especialmente para los casos secuenciales.

Finalmente, se analizó la variación interanual del número de HWds, así como la intensidad, duración y extensión espacial de estos eventos en toda la región en su conjunto. Los resultados revelaron tendencias positivas y significativas en el número de HWds a lo largo del periodo estudiado en el sur de Sudamérica. Se observó un aumento en la duración de las olas de calor húmedas simultáneas, mientras que la intensidad no mostró cambios significativos. Para las olas de calor húmedas secuenciales, también se registró un aumento significativo de HWds, pero sin cambios en la duración e intensidad. Además, se evidenciaron tendencias positivas y significativas en la extensión espacial de estos eventos en la región.

Este trabajo revela patrones significativos de la ocurrencia de eventos compuestos cálidos y húmedos en el sur de Sudamérica, identificando zonas donde son más frecuentes y cómo fueron cambiando sus características a lo largo de los años. Los resultados proporcionan información valiosa para abordar los posibles impactos de estos fenómenos extremos en el futuro.

REFERENCIAS

Collazo, S., Barrucand, M. & Rusticucci, M. Evaluation of CMIP6 models in the representation of observed extreme temperature indices trends in South America. *Climatic Change*, 172, 21 (2022).

Gu, L., Chen, J., Yin, J., Slater, L. J., Wang, H.-M., Guo, Q., et al. Global increases in compound flood-hot extreme hazards under climate warming. *Geophysical Research Letters*, 49(8) (2022).

Hao, Z., V. P. Singh, y F. Hao. Compound extremes in hydroclimatology: A review. *Water* (Switzerland), 10 (2018).

Leonard, M., S. Westra, A. Phatak, M. Lambert, B. van den Hurk, K. McInnes, J. Risbey, S. Schuster, D. Jakob, M. Stafford-Smith. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change*, 5: 113-128 (2014).

Li, D., J. Yuan, y R. E. Kopp. Escalating global exposure to compound heat-humidity extremes with warming. *Environmental Research Letters*, 15 (2020).

Olmo, M., M. L. Bettolli, y M. Rusticucci. Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern south america. *Weather and Climate Extremes*, 29 (2020).

Penalba, O.C., Robledo, F.A. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, 98, 531–550 (2010).

Re, M., Barros, V.R. Extreme rainfalls in SE South America. *Climatic Change* 96, 119–136 (2009)

Rusticucci, M., & Barrucand, M. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *Journal of Climate*, 17(20), 4099-4107 (2004).

Rusticucci, M., & Zazulie, N. Attribution and projections of temperature extreme trends in South America based on CMIP5 models. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1), 154-166 (2021).

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M.Rahimi,M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.* A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230 (2012).

Tencer, B., M. L. Bettolli, y M. Rusticucci. Compound temperature and precipitation extreme events in southern southamerica: Associated atmospheric circulation, and simulations by a multi-rcm ensemble. *Climate Research*, 68, 183–199 (2016).

Wang, P., Yang, Y., Tang, J., Leung, L. R., & Liao, H. Intensified humid heat events under global warming. *Geophysical Research Letters*, 48(2) (2021).

Yin, J., Slater, L., Gu, L., Liao, Z., Guo, S., & Gentine, P. Global increases in lethal compound heat stress: Hydrological drought hazards under climate change. *Geophysical Research Letters*, 49(18) (2022).

You, J., Wang, S., Zhang, B., Raymond, C., & Matthews, T. Growing threats from swings between hot and wet extremes in a warmer world. *Geophysical Research Letters*, 50(14) (2023).

Zscheischler, J., S. Westra, B.J.J.M. van den Hurk, S.I. Seneviratne, P.J. Ward, A. Pitman, A. AghaKouchak, D.N. Bresch, M. Leonard, T. Wahl, X. Zhang. Future climate risk from compound events. *Nature Clim Change*, 8, 469–477 (2018).

UTILIZACIÓN DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EVALUAR LA CONDICIÓN TRANSFRONTERIZA DEL ACUÍFERO SALTO

Agustina G. Martin Pedrol[a], Julián Ramos[b,c,d], María Eugenia Franzoni[e], Fabiana Robledo[f], Andrea Rodriguez[e], Regina Mancuso[f]

[a]*Departamento de Física, UNS, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*
[b]*Departamento del Agua, CENUR LN, Universidad de la República, URUGUAY.*
[c]*Departamento de Geodesia, Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, URUGUAY.*
[d]*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, ARGENTINA.*
[e]*Departamento Prospección, GEMP, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, ARGENTINA.*
[f]*Departamento de Investigación y Tecnología, PNGRR, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, ARGENTINA.*

e-mail: agustina.martin@uns.edu.ar

RESUMEN

La geofísica es una disciplina que realiza aportes en numerosas áreas del conocimiento, pues incluye una amplia variedad de métodos que permiten, a través de la medición de distintos parámetros físicos realizados en superficie, caracterizar el interior terrestre, en forma precisa y no invasiva. Los acuíferos son reservas de agua dulce que, si se gestionan de forma adecuada, sirven como fuentes de suministro de agua potable para las poblaciones. La escasa información hidrogeológica sistematizada, en el entorno de la ciudad de Concordia, Entre Ríos, constituyó el motivo por el cual se desarrolló este trabajo, pues se considera que el estudio de los acuíferos existentes, es de vital importancia para la región. Como objetivo del trabajo, se propuso comenzar a correlacionar la información geofísica obtenida en trabajos antecedentes en la ciudad fronteriza de Salto, Uruguay, donde ya se cuenta con un modelo hidrodinámico de los acuíferos someros, con los datos colectados en las cercanías de la ciudad de Concordia, Argentina. A modo de resultado, se muestra la similitud entre los modelos geoeléctricos en 1D y 2D mediante métodos electromagnéticos como el Método de Sondeo Transitorio Electromagnético en el Tiempo y métodos geoeléctricos como son los Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías de Resistividad Eléctrica. Se presentan los resultados obtenidos de los sitios ubicados en torno a la ciudad de Concordia y un sitio ubicado al SO de la ciudad de Salto, donde el acuífero detrítico tiene mayor potencia. Este trabajo se enmarca en el Trabajo de Tesis de Grado de la Licenciatura en Geofísica de la estudiante Agustina Martin Pedrol y en el plan de entrenamiento y puesta a punto del equipo WalkTEM2 (ABEM) que fuera donado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a la Comisión Nacional Energía Atómica.

Palabras Clave: Prospección Geofísica, Métodos Geoeléctricos y Electromagnéticos, Acuíferos Detríticos.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos o sistemas de aguas subterráneas son fuentes de riqueza bajo tierra. Sólo el 2,5% del agua presente en el mundo es agua dulce, y de ese 2,5% el 29,9% corresponde a las aguas subterráneas, según lo expresado por Collazo y Montaño (2012).
Perdomo, et al. (2011) resaltan que, conocer en detalle las características hidrogeológicas, químicas e hidráulicas de un acuífero es relevante, no solo para mejorar su explotación, sino

para protegerlo de posibles contaminaciones, tanto naturales como antrópicas y evaluar la eficiencia en posibles procesos de remediación. A su vez, Bierkens y Wada (2019), remarcan que la expansión de la agricultura ha aumentado considerablemente el requerimiento de agua subterránea tanto en cantidad como en calidad junto con el creciente aumento de la población que, si bien poseen acceso a agua superficial limpia, utilizan cada vez más agua subterránea aumentado drásticamente el uso de las mismas, ocasionando mayor vulnerabilidad del recurso hídrico. La mayoría de las fuentes de agua subterránea están en una situación potencial de riesgo creciente, debido a factores tales como el crecimiento permanente de la demanda de agua en ciudades, la explotación descontrolada y la contaminación de las zonas de recarga. Muchos de los problemas que afectan a las aguas subterráneas se relacionan con la falta de información. (Ramos, 2015)

En el entorno de las ciudades vecinas de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay), existen tres acuíferos importantes. Los más someros, denominados El Palmar, Salto Chico y Serra Geral en Argentina (acuíferos Salto y Arapey en Uruguay) se encuentran divididos por el río Uruguay, según expresa Gomez (1989), río a lo largo del cual se encuentra una falla normal que genera grandes diferencias en las columnas estratigráficas en ambos lados del río. El acuífero El Palmar constituye un sistema acuífero de tipo detrítico libre a semiconfinado, mientras que el acuífero Serra Geral, es un acuífero en rocas basálticas fracturadas de la Fm. Arapey/Fm. Serra Geral (Marco, 2016). El acuífero profundo, denominado Sistema Acuífero Guaraní, es una de las reservas de agua dulce más grande del planeta y se extiende en parte de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. En el entorno de las mencionadas ciudades, este acuífero se encuentra a profundidades de 950 m. Desde hace algunas décadas, estos acuíferos están siendo estudiados con el objetivo de determinar sus dimensiones, piezometría y sus parámetros hidráulicos, y se calibraron modelos matemáticos que reproducen su comportamiento.

Una herramienta práctica y económica que se implementa para conocer la geometría de estos sistemas es proporcionada por diferentes métodos geofísicos aplicados. Entre los más recomendados para investigaciones hidrogeológicas, se encuentran los métodos eléctricos y electromagnéticos, que miden de manera indirecta la resistividad eléctrica, una propiedad física de los materiales, cuya variación está fuertemente influenciada por la presencia de agua, entre otros factores como pueden ser: composición y porosidad del medio, grado de saturación, salinidad del agua, entre otras. Entre los métodos eléctricos encontramos los de corriente continua como son el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), el Perfilaje Eléctrico (PE) y la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT). Por otro lado, se tiene a los métodos electromagnéticos, como los Sondeos Magnetotelúricos y Audiomagnetotelúricos (MT y AMT) y el Transitorio Electromagnético en el dominio del Tiempo (TDEM) (Orellana, 1972; Telford et al., 1990).

La escasa información hidrogeológica sistematizada, en el entorno de la ciudad de Concordia, Entre Ríos, la disponibilidad de datos previos geofísicos y de equipamiento para generar nuevos datos (SEV, ERT, TDEM), motivó a iniciar un trabajo de investigación, pues se considera que el estudio de los acuíferos existentes, es importante para la región.

Como objetivo del trabajo, se propuso comenzar a estudiar la configuración hidrogeológica en el entorno de la ciudad de Concordia, a partir de la correlación de la información geofísica existente en Salto, Uruguay, y generar conocimiento que sirva de utilidad para estudiar a futuro la continuidad del acuífero.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El área de estudio elegida para este trabajo (Fig. 1), tiene una superficie de 2300 km^2 y se sitúa en el entorno de las ciudades de Concordia y Salto.

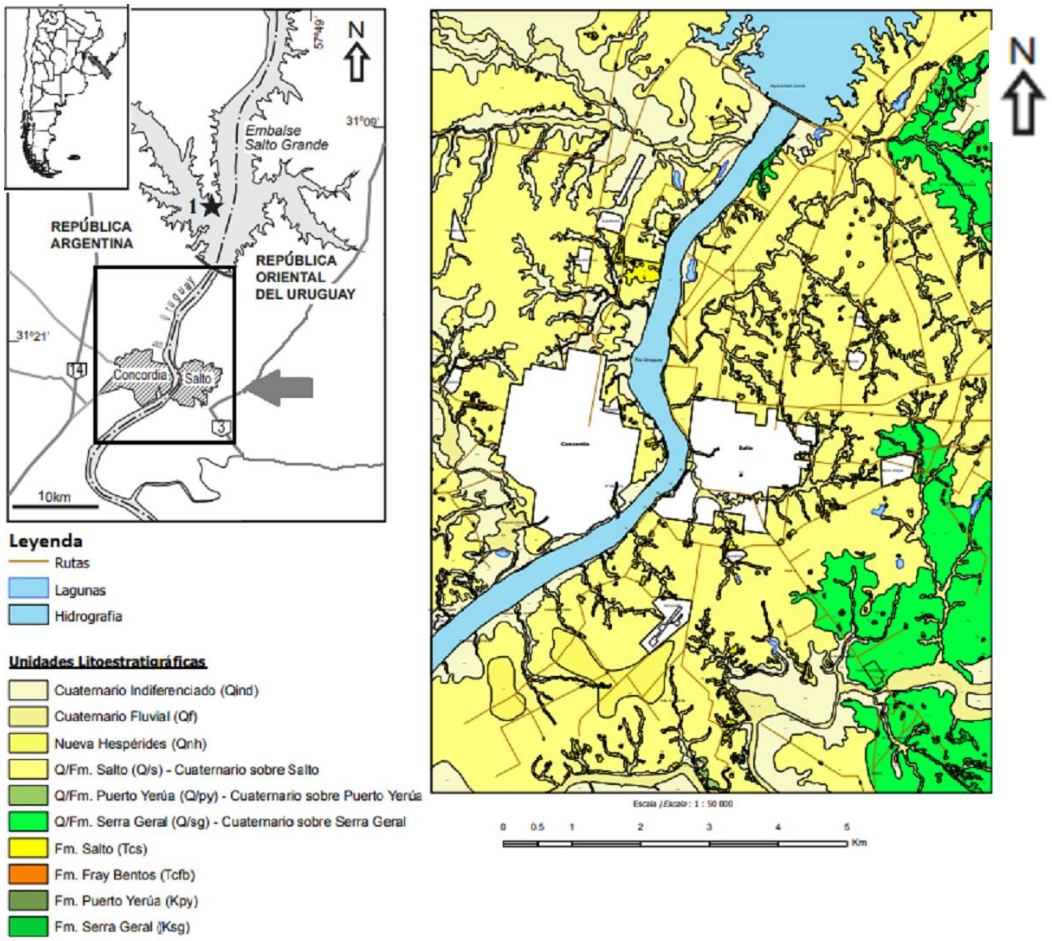


Figura 1. Área de estudio y Mapa Geológico (modificado de Ramos, R. S., Brea, M., Kröhling, D. M. (2015) y PyT Consultora S.R.L. (2006-2007))

Entre Ríos, está situada en el borde sur de la cuenca Chaco – Paranaense, la cual tiene desarrollos someros hacia el sureste de la provincia y profundizaciones hacia el oeste y noroeste. Tipificada como de intraplaca y no vinculada a procesos de subducción, alberga sedimentitas continentales y marinas de edades comprendidas entre el Paleozoico Medio y el Cuaternario (Santi, et al 2013).

En superficie, las rocas más antiguas del área de estudio comprenden a la Fm. Serra Geral, compuesta por potentes derrames de basaltos del Cretácico Inferior, que afloran en el sector noreste en una delgada faja aledaña al río Uruguay. Desde el punto de vista hidrogeológico, la porción de basaltos fisurados y alterados es acuífera por permeabilidad secundaria y la porción compuesta por basaltos masivos y potentes, constituye el basamento acuífugo regional (Filí, 2001).

Sobre la Fm. Serra Geral, apoya en discordancia la Fm. Puerto Yeruá (Cretácico Superior), compuesta por arenas y areniscas conglomerádicas de tonalidad predominantemente rojiza (Filí, 2001). En Uruguay, la Fm. Puerto Yeruá tiene su equivalencia en las formaciones Guichón, Mercedes, Queguay y Asencio.

Sobre las sedimentitas cretácicas se apoyan en discordancia niveles sedimentarios compuestos por areniscas muy finas a limos calcáreos, de colores pardo rosado a rosado y anaranjado, mantiformes, que no suelen presentar estratificación, con niveles paleoedáficos, lentes de conglomerados y calcretes (Tófalo, 1987). Estas sedimentitas son denominadas como Fm. Fray Bentos, fueron asignadas al Oligoceno Inferior a Medio (Herbst, 1980) y se comportan hidráulicamente en modo variable, desde predominantemente acuitardo, con intercalaciones de algunas capas acuíferas de poco espesor, hasta francamente acuícludo (Filí, 2001).

La secuencia terciaria continúa con depósitos fluviales principalmente gravosos, a los que Rimoldi (1962) denominó como Fm. Salto Chico. Esta unidad sedimentaria del Pleistoceno Inferior es correlacionable con la Fm. Ituzaingó, en Entre Ríos, y con la Fm. Salto en Uruguay. Iriondo (1980) cita a las sedimentitas de la Fm. Salto Chico para referirse a las localizadas a ambas márgenes del río Uruguay y a las de la Fm. Ituzaingó para las que se encuentran en las barrancas del río Paraná. Estas unidades fluviales conforman una secuencia de gravas clasto-sostén con una matriz arcillo-limosa de colores diversos: pardo rojiza, blanquecina, castaño claro y otros tonos similares. Puede presentar intercalaciones de arcilla castañas claras y/o verdosas con matriz ferruginosa que les da mayor consolidación (Silva Busso y Amato, 2017). La Fm. Salto Chico es un acuífero semiconfinado, cuyo espesor máximo se estima en el orden de los 60 m y se explota en el sector oriental de Entre Ríos. Es denominado también "acuífero arrocero" por su intensivo uso en el riego de ese cultivo (Santi, 2013). En el caso de su equivalente uruguayo, según Montaño (2006), la Fm. Salto constituye un acuífero poroso y libre conformado por sedimentos arenosos a conglomerádicos, de un espesor máximo de 30 m al sur de la ciudad de Salto, Uruguay.

Silva Busso y Amato (2017) mencionan una formación de origen fluvial, de importancia estratigráfica y muy extensa en el este entrerriano: la Fm. Ubajay. Previamente descripta en Iriondo (1996) como Fm. El Palmar, con predominio de arenas finas a medianas, de colores rojizos amarillentos y ocres, de edad holocena e interpretada como una terraza alta del río Uruguay. Santi et al. (2013) definen a esta unidad como un acuífero libre.

La secuencia sedimentaria previamente descripta posee una cubierta superior, de edad pleistocena media a la que Reig (1956) define como Fm. Hernandarias. Está compuesta por limos y arcillas limosas con proporción variable de arena fina a muy fina; pueden distinguirse dos niveles: uno inferior, más arcilloso, de color gris plomizo a verdoso que contiene acumulaciones de yeso, formadas por concreciones de cristales y drusas, y otro superior, de coloración castaño rojizo, constituido principalmente por limos, que contienen en la cúspide concreciones calcáreas o niveles de tosca discontinuos. Es característica del centro-este y poniente entrerriano (Silva Busso y Amato, 2017).

Tabla I. Columna estratigráfica y comportamiento hidrogeológico de las unidades descriptas (modificada de Filí (2001), Santi et al. (2013), Silva Busso y Amato (2017), Tofalo (1986))

Formación	**Edad**	**Litología**	**Hidro Estratigrafía**
Hernandarias	Pleistoceno Medio	Limos y arcillas limosas con proporción variable de arena fina a muy fina	Acuitardo
Ubajay	Holoceno	Predominan las arenas finas a medianas de colores rojos, amarillentos y ocres donde intercalan niveles conglomerádicos matriz-sostén de poco espesor con rodados de ópalos, calcedonia y eventualmente fragmentos de basaltos.	Acuífero libre
Salto Chico	Pleistoceno Inferior	Arenas cuarzosas gruesas, medianas y finas de color amarillo y rojo, arcillas verdes y estratos irregulares de rodados finos y gruesos.	Acuífero semiconfinado

Fray Bentos	Oligoceno Inferior a Medio	Areniscas muy finas a limos calcáreos, de colores pardo rosado a rosado y anaranjados, con niveles paleoedáficos, lentes de conglomerados y bancos de carbonatos (calcretes)	Acuitardo y/o Acuífero
Puerto Yeruá	Cretácico Superior	Arenas y areniscas conglomerádicas de coloraciones rojizas parduzca y rosado, de origen fluvial, que presentan en ocasiones lentes irregulares de arcilitas rojizas	Acuífero
Serra Geral	Cretácico Inferior	Derrames basálticos con intercalaciones clásticas	Acuífero en basaltos fisurados y en niveles clásticos Acuífugo en basaltos masivos

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la investigación se utilizó información de la base de datos geofísicos del Departamento del Agua del Centro Regional Litoral Norte de la Universidad de la República de Uruguay y la consultada en el Tomo 1 volumen 6 del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG).

Asimismo, se tomaron datos de ERT, SEV y TDEM. Para la adquisición de ERT se utilizó un equipo modelo GD-10 Supreme + de la firma GEOMATIVE. Para esta tarea se utilizaron entre 48 y 72 electrodos separados cada 10 m y 20 m. El número de electrodos y la separación se seleccionó en función de la profundidad de investigación estudiada y el nivel de detalle deseado. Para realizar las mediciones se utilizaron dos arreglos, el Wenner Alpha y Wenner Schlumberger, y se observó una mejor resolución de las capas de interés con el segundo arreglo mencionado. La inversión de los datos se realizó mediante el programa RES2DINV de SEEQUENT, y se obtuvieron las imágenes de resistividad eléctrica de cada transecto relevado. La ubicación de las nuevas estaciones de ERT se identifican en el mapa de grado de estudio como ERT 1 - AR y ERT 2 - AR.

Para la adquisición de datos de SEV, se utilizó el mismo resistivímetro detallado previamente, utilizando el arreglo Schlumberger, donde se mantienen fijos los electrodos MN y los electrodos A y B se van alejando para aumentar la profundidad de investigación. Este conjunto es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. En áreas en donde ambos tipos de estructuras geológicas son esperadas, este conjunto puede ser utilizado convenientemente. Luego para realizar la inversión de datos se utilizó el programa IPI2WIN de la Universidad Estatal de Moscú. Las estaciones de SEV nuevas se pueden identificar en el mapa como SEV 1 - AR y SEV 2 - AR .

Por último para la adquisición de los datos de TDEM se utilizó el equipo WalkTEM2 de la firma ABEM. El equipo está integrado por un receptor (RX) y un transmisor (TX60), con una fuente de poder externa para el transmisor. La bobina transmisora utilizada fue de 100x100m, una antena receptora RC-200 y cables conectores. Para culminar el análisis de los datos se realizó la inversión de datos para la cual se utilizó el programa SPIA de SEEQUENT y se localizaron las estaciones en mapa de grado de avance de estudio geofísico como TEM 1 - AR, TEM 2 - AR y TEM 3 - AR. En la Fig. 2 se muestra una foto del grupo realizando las tareas de campo para la adquisición de los datos previamente mencionados.



Figura 2. Fotos del trabajo de campo.

La ubicación de cada estación fue montada en Google Earth y se elaboró un mapa del grado de estudio geofísico del área de estudio. (Fig. 3).

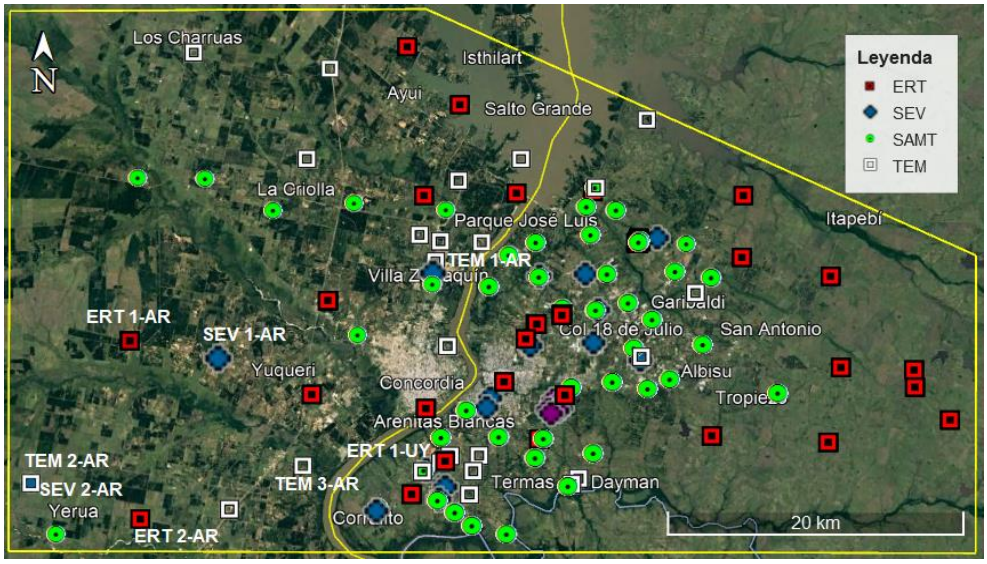


Figura 3. Mapa del grado de estudio geofísico del área estudiada.

La ERT denominada ERT 01 - UY (Fig. 4) se seleccionó como paramétrica por encontrarse en la zona en que, según Montaño (2004), el acuífero Salto es más potente. Otro criterio para la selección fue que se encuentra en las inmediaciones de un pozo que cuenta con descripción litoestratigráfica que advierte un espesor de la Fm. Salto de 32 m, seguida de 14m de Fm. Fray Bentos. El nivel estático se encuentra a los 12 mbbp. La tomografía de resistividad eléctrica presentada en la Fig. 4, se tomó a modo de ejemplo descriptivo, por lo que también se obtuvieron datos paramétricos del trabajo realizado por Ramos, et. al. (2017).

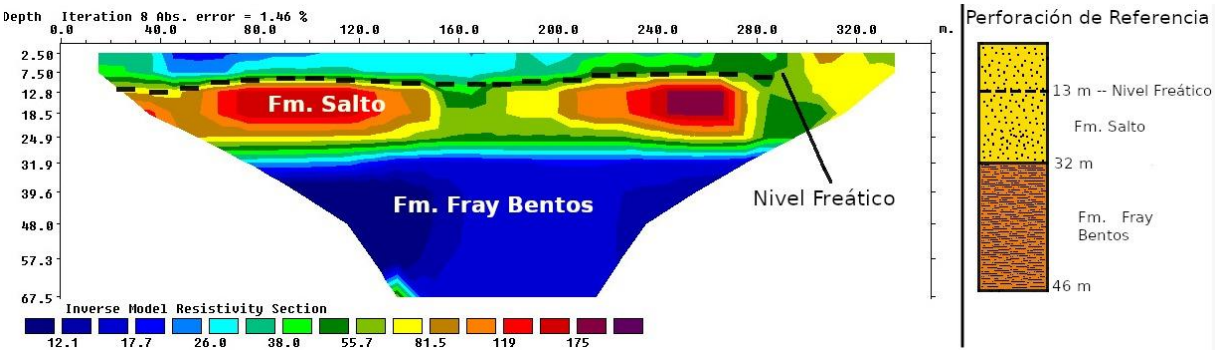


Figura 4. Modelo geoeléctrico paramétrico de la ERT 1 - UY. Arreglo Wenner Alpha.

Puede observarse que la Fm. Salto Chico tiene un comportamiento heterogéneo en términos de resistividad. En los primeros metros, en la zona no saturada, los valores de resistividad son medios a bajos, entre 20 y 60 ohm.m, lo que podría interpretarse como una zona edáfica de mayor arcillosidad. En la zona saturada, la Fm. Salto Chico tiene valores de resistividad medios a altos (50 a 120 ohm.m). El aumento de resistividad podría deberse a una disminución de la arcillosidad de la Fm. Salto y/o a que, por lo observado en Erasun et. al. (2020), el agua que satura los poros estaría poco cargada por ser de recarga reciente. La Fm. Fray Bentos tiene un comportamiento homogéneo con valores inferiores a 26 ohm.m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran a continuación, en las Fig. 5 y 6 los modelos geoeléctricos obtenidos luego de invertidos los resultados adquiridos en cada estación de ERT seleccionada. El arreglo electródico mostrado corresponde Wenner Schlumberger, por ser el más sensible a las variaciones verticales de la resistividad eléctrica y por ser el arreglo que arrojó menor error de ajuste

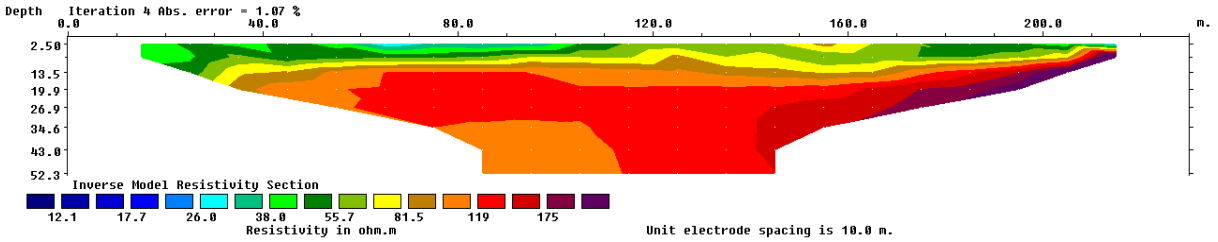


Figura 5. Modelo geoeléctrico ERT 1 - AR. Arreglo Wenner Schlumberger.

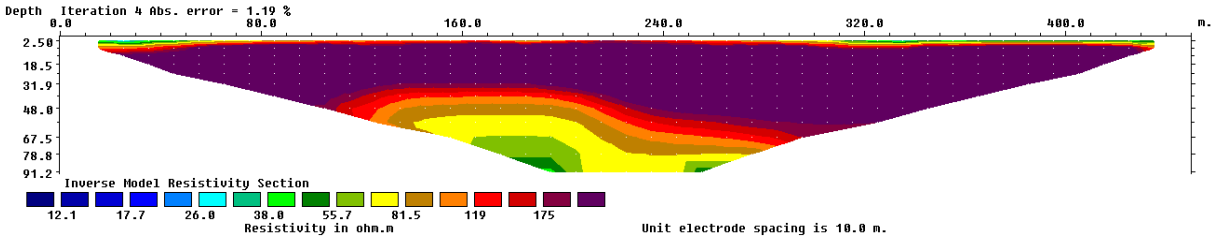


Figura 6. Modelo geoeléctrico ERT 2 - AR. Arreglo Wenner Schlumberger.

En la ERT 1 - AR se observa una primera capa con resistividades medias a bajar y luego a los 15 m de profundidad aproximadamente, hay un aumento notable en la resistividad. En comparación con la ERT 1 - UY se puede interpretar un comportamiento resistivo similar, aunque no se llega con la profundidad de investigación para observar el contacto con una capa de baja resistividad

La ERT 2 - AR tiene un comportamiento geoeléctrico parecido a la ERT 1 - UY, con la diferencia de que la primera capa es mucho más pequeña en espesor, y que la segunda capa es mucho más potente. El contacto con la capa de bajas resistividades es más profundo y menos acentuado en el contraste de las resistividades

Por otra parte, se presentan a continuación, en las figuras 7 y 8 los modelos geoeléctricos luego de realizar la inversión de los datos de SEV. El arreglo electródico que se utilizó corresponde al Schlumberger. Ambos SEV están realizados en la cercanía de las ERT correspondientes a las figuras, el motivo de dicha cercanía es poder relacionar ambos métodos.

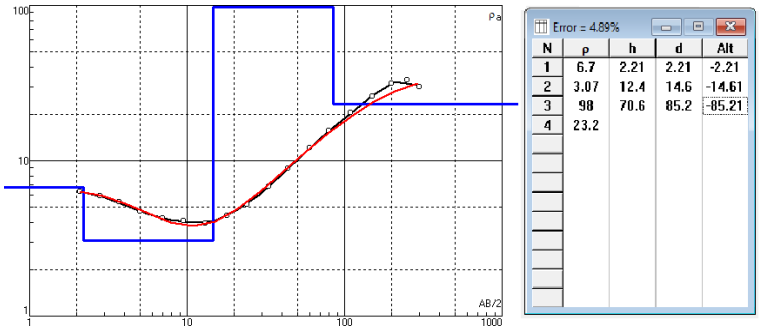


Figura 7. Modelo geoeléctrico SEV 1 - AR. Arreglo Wenner Schlumberger.

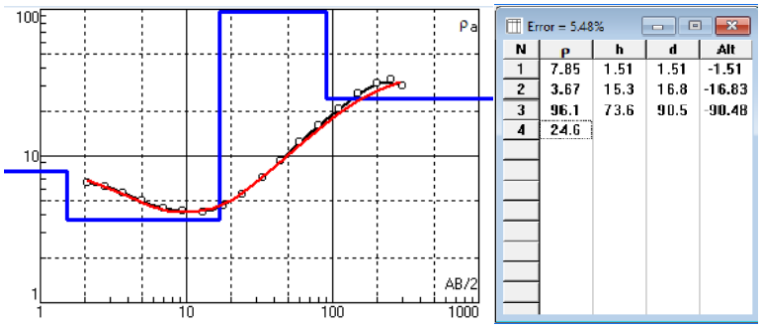


Figura 8. Modelo geoeléctrico SEV 2 - AR. Arreglo Wenner Schlumberger.

En ambos sondeos eléctricos verticales se observa un comportamiento esperado en comparación con la ERT paramétrica y los datos de pozo obtenidos. Se observa una primera capa de baja resistividad, seguido por un aumento de la resistividad y continuado por un nuevo descenso de la misma. Por lo que puede interpretarse un sistema de 3 capas bien distinguidas.

Para realizar un análisis más completo de la zona, a continuación, en las Fig. 9, 10 y 11, se presentan los modelos de capas obtenidos a partir de la inversión de los datos de TEM y así poder hacer una comparación de los métodos y los resultados obtenidos.

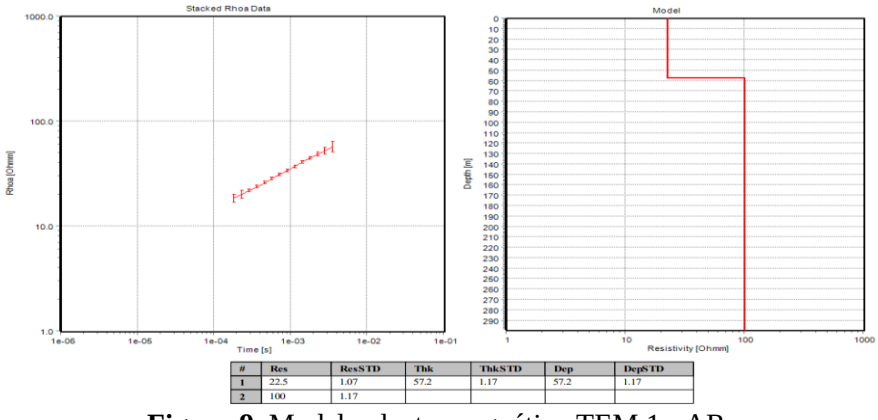
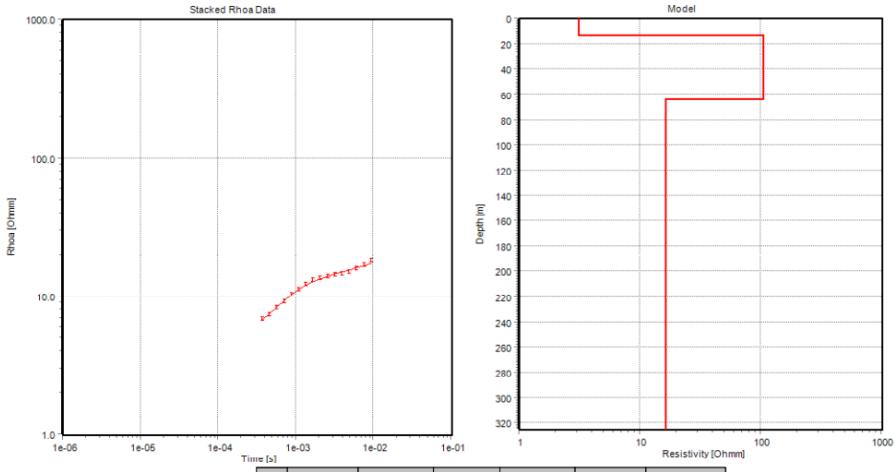
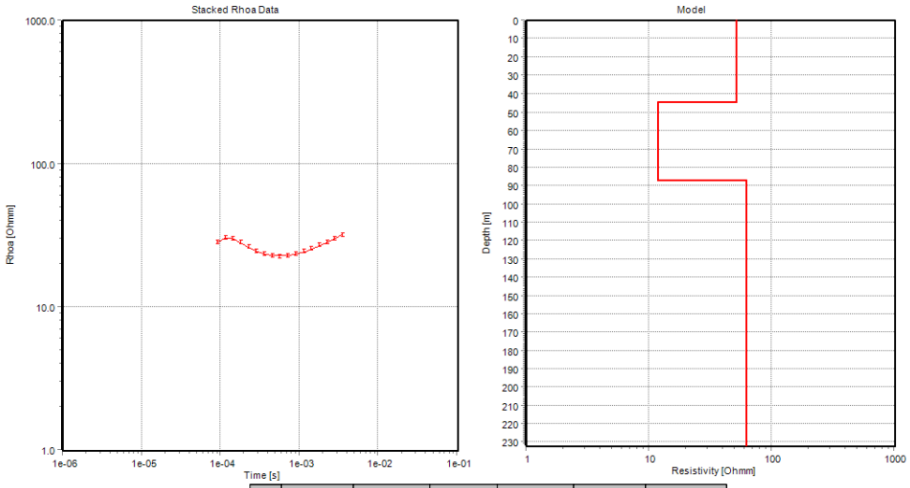


Figura 9. Modelo electromagnético TEM 1 - AR.



#	Res	ResSTD	Thk	ThkSTD	Dep	DepSTD
1	3.1	99	12.8	99	12.8	99
2	104	99	50.3	99	63.2	4.36
3	16.2	1.13				

Figura 10. Modelo electromagnético TEM 2 - AR.



#	Res	ResSTD	Thk	ThkSTD	Dep	DepSTD
1	51.4	1.1	44.2	1.14	44.2	1.14
2	11.8	1.23	42.6	1.42	86.8	1.11
3	61.9	1.2				

Figura 11. Modelo electromagnético TEM 3 - AR.

En el TEM 1 - AR se puede interpretar un modelo de dos capas, donde el contacto que se observa, se puede interpretar como el techo de la Fm. Salto
En el TEM 2 - AR se puede ver un modelos de tres capas, una primera con bajas resistividades, una segunda capa con resistividades más altas, y la en la tercera la resistividad vuelve a bajar. Puede verse un comportamiento similar en SEV 2 - AR realizada en el mismo sitio, por lo que se puede decir que ambos métodos describen el comportamiento del subsuelo con igual precisión, aunque con menor profundidad en el caso del SEV.
En el TEM 3 -AR se puede interpretar un modelo de 3 capas, donde la primera es una capa con resistividades altas, luego se observa una disminución en la segunda capa y un aumento de la resistividad en la tercera capa. A diferencia de los datos paramétricos presentados en la Fig. 3, no se observa la capa superficial con resistividades bajas.
A modo de resumen de los datos obtenidos, se realizó la Tabla II donde se puede visualizar cada estación, con el modelo de capas y la resistividad obtenida para cada una de ellas. La falta de datos en Uruguay para correlacionar, el poco contraste entre las resistividades, el poco espesor de las capas o la profundidad de investigación alcanzada, pueden ser los motivos por los cuales no se puedan diferenciar u observar algunas capas.

Tabla II: Resumen de los datos obtenidos

	ERT 1 - AR	ERT 2 - AR	SEV 1 - AR	SEV 2 - AR	TEM 1 - AR	TEM 2 - AR	TEM 3 - AR
Capa 1: Fm. Hernandarias	h:12m	h: 10m	h: 12,4m	h: 15,3m	h: 57,2m	h:12,8m	No se observa
	$\rho_{\square}$:50Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:47,8 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:3,07 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:3,67 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:22,5 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:3,1Ω. $\square$	
Capa 2: Fm. Salto Chico	h: 40m	h: 50m	h: 70,6m	h: 73,6m	Techo	h: 63,2m	h: 44,3m
	$\rho_{\square}$:100 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:24Ω. $\square$ 0	$\rho_{\square}$:98Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:96,1 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:100 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:104 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:51,4 Ω. $\square$
Capa 3: Fm. Fray Bentos	No se observa	h: 81,5m	Techo*	Techo*	No se observa	Techo*	h: 86,9m
		$\rho_{\square}$:30Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:23,2 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:24,6 Ω. $\square$		$\rho_{\square}$:16,2 Ω. $\square$	$\rho_{\square}$:11,8 Ω. $\square$
Capa 4: Fm. Serra Geral	No se observa	No se observa	No se observa	No se observa	No se observa	No se observa	Techo*
							$\rho_{\square}$:61,9 Ω. $\square$

(*) Significa que solo se logra distinguir un contraste en las resistividades, que se puede asociar al techo de la formación, pero no se puede identificar el espesor real de la misma.

En términos generales, se puede decir que los sitios explorados tienen un comportamiento similar, en cuanto a los rangos de resistividad eléctrica, al observado en la ERT realizada en la zona de mayor espesor del acuífero Salto en Uruguay. Asimismo, en cada sitio, la profundidad del contacto con la zona de baja resistividad, es coherente con la observada sobre la margen izquierda del río Uruguay. Cabe aclarar que para poder interpretar esta zona de baja resistividad como correspondiente a Fm. Fray Bentos, será necesario realizar estudios paramétricos en el entorno de la ciudad de Concordia, donde se pueda contar con información litoestratigráfica de pozos.

Por último, se puede observar que los SEV se corresponden en gran medida con las ERT realizadas en sus cercanías. Esto ayuda a asegurar la veracidad de los datos con ambos métodos y a su vez poder compararlos.

CONCLUSIONES

Se realizó una comparación entre siete modelos geoeléctricos obtenidos en el entorno de la ciudad de Concordia y un modelo geoeléctrico antecedente que se ubica al sur de la ciudad de Salto, Uruguay, donde el acuífero tiene su mayor espesor.

Del análisis realizado se desprende que el comportamiento de la primera parte del corte geoeléctrico, tiene valores bajos a medios de resistividad eléctrica que podría interpretarse como Fm. Hernandarias, la segunda capa presenta un aumento de la resistividad que puede ser vista como Fm. Salto y por último la tercera capa con una disminución considerable de la resistividad que podría corresponderse con la presencia de Fm. Fray bentos. Para poder realizar la afirmación de esto último, será necesario realizar a futuro estudios paramétricos.

La utilización de dos métodos geoeléctricos distintos, como son las Tomografías de Resistividad Eléctrica y los Sondeos Eléctricos Verticales, y un método electromagnético como son los TEM, que colaboran con la interpretación de los datos y ayuda a experimentar la utilización de distintas metodologías de campo. Dicho esto, los resultados de los tres métodos son similares, pero a la hora de la interpretación las ERT son más sencillas; en contraparte en lo que es trabajo de campo los SEV son más simples de realizar, y en cuanto a los TEM el trabajo de campo es más sencillo que en los métodos eléctricos y la profundidad de

investigación es algo mayor, pero la logística y diseño de la campaña es más compleja, ya que se necesitan áreas extensas sin contaminación de alambrados o cables de alta o media tensión entre otros.

Caracterizar los acuíferos es un beneficio importante para la población, ya que de los mismos se puede extraer agua para el abastecimiento de la población, el riego de sus cultivos y utilizarla con fines recreativos.

Uniendo los métodos geofísicos con los estudios hidrogeológicos, es posible conocer con detalle el comportamiento de los acuíferos y de esta forma preservarlos.

Por último, se recomienda continuar el estudio utilizando esta metodología, a fin de tener datos significativos que permitan realizar un estudio estadístico del comportamiento geoeléctrico de las formaciones sobre la margen derecha del río Uruguay. Es importante, el aporte de los TEM ya que permiten una mayor profundidad de investigación, y así empezar con el estudio del acuífero fracturado en el entorno de la ciudad de Concordia, en vista a construir a futuro, un modelo geológico geofísico del sistema que podrá correlacionarse con parámetros de calidad de agua y servirá de base para la elaboración de un modelo hidrodinámico acoplado al existente en Salto. A su vez también es de suma importancia poder contar con descripciones de pozos litoestratigráficos, para así poder comparar con lo que muestran los modelos geofísicos.

REFERENCIAS

Bierkens, M. F. y Wada, Y. 2019. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review.Environmental Research Letters, 14(6), 063002.

Collazo, M.P y Montaño J., 2012. Manual de Aguas Subterráneas, Montevideo, Uruguay.

Dahlin T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences, 27(9), 1019-1029.

Erasun, V., Campet, H., Vives, L., Blanco, G., Banega, R., Sapriza, G., Gaye, M., Ramos, J., Alvareda, E., Gamazo, P y Saracho, A., 2020. Modelación del Sistema Acuífero Salto Arapey (Uruguay). Revista Latino-Americana de Hidrogeología, número especial - Octubre/2020-3, p. 68-75

Gomez Rifas, C., 1989. Tectónica Cretácica en Uruguay. Contribuciones de los Simposios sobre Cretácico de América Latina, Parte A, Eventos y Registro Sedimentario, 319-325. Buenos Aires.

Hidalgo, A. L., Loke, M. H., Fanton, G. O., & Rubí, E. C. 2010. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D).

Iriondo, M. H., & Kröhling, D. 2007. La Formación El Palmar (informalmente Fm Salto Chico) y el acuífero San Salvador. Entre Ríos. 5 Congreso Argentino de Hidrogeología. Paraná), Resúmenes, 433-441.

Perdomo, S., Ainchil, J. y Kruse, E., 2011. Relación entre la conductividad hidráulica de un acuífero y parámetros geoeléctricos en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26452

Marco. 2016. Programa marco para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático. Aguas subterráneas del Plata

Montaño, J. 2004. El acuífero Salto: Un recurso hídrico cenozoico. En: eds. Cuencas sedimentarias de Uruguay. Geología, Paleontología y Recursos Naturales. Cenozoico. DIRAC-FC. Montevideo Uruguay, 315-322

Montaño, J., Gagliardi, S., Montaña, M., 2006. Recursos hídricos subterráneos del Uruguay, Boletín Geológico Minero, v. 117(1), 201-222

Orellana, E. 1972. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua: Madrid. España, Editorial Paraninfo. PyT Consultora S.R.L. 2006-2007. Informe sobre Mapeo Geológico del Área Piloto Concordia - Salto. Godoy Cruz, Mendoza.

Ramos, J., Gamazo, P., Saracho, A., Rodríguez, W., & Carraz, O. (2017). Caracterización geoeléctrica de un sector de los acuíferos salto y arapey mediante el empleo de SEV y sondeos audiomagnetotelúricos. Revista SUG Nº20, 30, 36.

Ramos, J. "Influencia del Lago de la Represa de Salto Grande sobre el Acuífero Salto Chico". Tesis en opción al grado de Master (inédita), Universidad Tecnológica Nacional, 2015.

Ramos, R. S., Brea, M., & Kröhling, D. M. 2015. Primer registro de Cryptocaryoxylon Leisman, una Lauraceae de la Formación El Palmar (Pleistoceno tardío), Entre Ríos, Argentina. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, 17(1), 59-70.

Santi, M., Bianchi, G. J., & Rezzónico, G. 2013. Caracterización de los principales acuíferos de la provincia de Entre Ríos. In VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamricano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea.

Silva Busso, A., & Amato, S. (2017). Depósitos fluviales del Plio-pleistoceno-holoceno de la Provincia de Entre Ríos y sus Implicancias Hidrogeológicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, *74*(3), 338-356.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. 1990. Applied geophysics. Cambridge university press.

Tofalo, O.R. 1986. Depósitos clásticos y carbonáticos del Cretácico Superior, Formación Puerto yeruá, Entre Ríos. 1º Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 201-204, La Plata.

MODELADO NUMÉRICO DE DISPERSIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA POR ENSAMBLES: CASO ERUPCIÓN DEL VOLCÁN LÁSCAR DICIEMBRE 2022

Micaela Clara Maurizi y María Soledad Osores

Servicio Meteorológico Nacional, ARGENTINA

e-mail: mmaurizi@smn.gob.ar

RESUMEN

La dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, producto de erupciones volcánicas o remobilización eólica del material volcánico depositado, presenta una amenaza para la seguridad de la aviación a nivel mundial. Esto representa una preocupación especialmente para los países del sur de América del Sur, cuya geografía está marcada por la cadena montañosa de la Cordillera de los Andes, donde la actividad volcánica explosiva inyecta frecuentemente ceniza volcánica en su espacio aéreo. Una vez que estas partículas volcánicas son inyectadas en la atmósfera, pueden ser transportadas a grandes distancias, abarcando cientos e incluso miles de kilómetros desde el volcán de origen, agravando aún más el riesgo para la aviación. En este contexto, los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC) juegan un papel esencial proporcionando pronósticos sobre la dispersión de las nubes de ceniza volcánica. Estos productos son cruciales para la toma de decisiones en la industria de la aviación y la seguridad de los vuelos. En los próximos años, se avecina un cambio significativo en la producción de los VAACs con la introducción de la Información Cuantitativa de Cenizas (QVA). El QVA permitirá a los usuarios tomar decisiones basadas en pronósticos por ensamble de concentración de cenizas modelada. Con el fin de definir las configuraciones adecuadas para los volcanes de la región y garantizar la calidad de los pronósticos de dispersión por ensambles del VAAC de Buenos Aires, se realizan estudios de sensibilidad del modelo FALL3D 8.1 perturbando diversos parámetros del término fuente utilizando casos del pasado. Aquí analizamos la sensibilidad del modelo utilizando como caso de estudio la erupción del volcán Láscar ocurrida en diciembre de 2022. Los resultados de este trabajo, contribuirán a la provisión de información clave para la seguridad aérea en los próximos años.

Palabras Clave: Ceniza Volcánica, VAAC, Información Cuantitativa de Cenizas, Modelado Numérico, Ensambles.

INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas explosivas inyectan ceniza en la atmósfera que puede ser transportada a grandes distancias, abarcando cientos e incluso miles de kilómetros desde su origen, generando múltiples impactos. En particular en la industria aeronáutica representa una gran amenaza, ya que bajo ciertas condiciones puede generar daños severos en los motores de las aeronaves (Clarkson et al. 2016), por esta razón se cancelan vuelos y en ocasiones cierran aeropuertos generando pérdidas millonarias (Guffanti et al.2009).

En este contexto, hacia fines del siglo XX se estableció, dentro de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), el sistema de Vigilancia de Volcanes en Aerovías Internacionales (IAVW) dentro del cual se establecieron 9 Centros de Avisos de Ceniza Volcánica (VAAC) alrededor del mundo, ver Fig.1. Estos centros tienen como funciones principales monitorear la presencia de ceniza volcánica en la atmósfera, y en caso de

detectar la presencia de ceniza, los VAAC deben proporcionar los avisos de ceniza volcánica (VAA) que incluyen información sobre la extensión de la pluma de ceniza observada y el pronóstico de su dispersión. El VAAC Buenos Aires está ubicado en la sede central del Servicio Meteorológico Nacional en Argentina. Su área de responsabilidad abarca la región entre los 10° y 90° de latitud sur, y los 10° y 90° de longitud oeste.

Tras la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull en 2010, que tuvo un gran impacto en la aviación europea, con la cancelación de 100 mil vuelos en más de 20 países durante la primera semana (Alexander, D. 2013), el criterio de tolerancia cero a la presencia de ceniza volcánica en el espacio aéreo comenzó a ser cuestionado. Esto llevó al análisis por parte de las autoridades de aviación civil de Europa y un fabricante de motores sobre la posibilidad de permitir vuelos siempre y cuando la concentración de ceniza se mantuviera por debajo de ciertos límites (Beckett et al. 2020), determinaron los umbrales de tolerancia en función a la concentración de ceniza y el tiempo de exposición para cierto modelo de motores. A partir de esto los servicios meteorológicos que operan los VAACs de Londres, Toulouse y Buenos Aires, es decir la UK MetOffice, Meteo France y el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina respectivamente, comenzaron a brindar pronósticos de concentración de ceniza modelada como producto suplementario (Osores, 2018).

Esto representó un cambio radical en la forma en que la aviación civil operaba, ya que, hasta ese momento, cualquier indicio de ceniza, incluso mínimo, resultaba en el cierre del espacio aéreo, práctica que en el resto del mundo aún persiste.

Luego de años de avances en ciencia a nivel mundial y en las operaciones aeronáuticas en Europa y el Atlántico Sur, el IAVW avanza desarrollando un nuevo servicio de "Información Cuantitativa de Ceniza Volcánica" (QVA) que proveerán los VAAC. Este servicio permitirá a los usuarios tomar decisiones fundamentadas en pronósticos basados en la concentración de cenizas modelada, lo que se prevé implementar hacia fines de 2024 en su etapa de capacidades operativas iniciales (Roadmap IAVW, 2021).

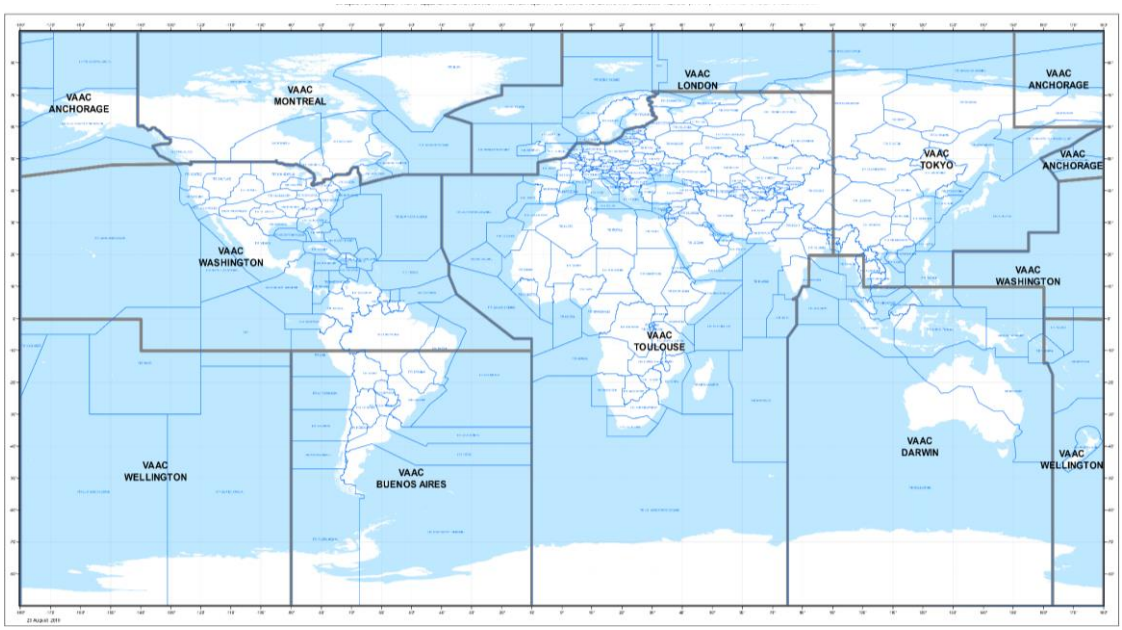


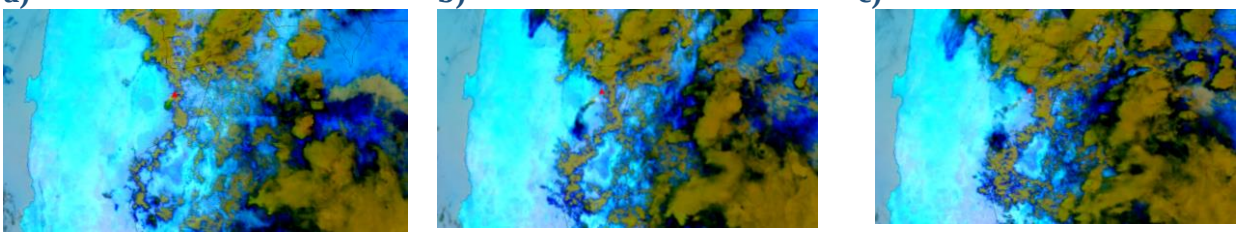
Figura 1. Distribución de los 9 Centros de Avisos de Ceniza Volcánica alrededor del mundo.

El nuevo servicio de información QVA incluirá la provisión de los datos de modelado numérico de concentración determinístico y probabilístico para umbrales establecidos en puntos de grilla (Roadmap, 2021). La información determinística consiste en una única configuración de las parametrizaciones y condiciones iniciales del modelo de dispersión. Las condiciones iniciales están dadas por los parámetros del término fuente (granulometría total, altura de columna, estructura de la pluma de ceniza, entre otros), y las condiciones meteorológicas. Las simulaciones de dispersión determinísticas, no brindan información sobre la incertidumbre del modelo. Mientras que la estrategia de modelado por ensambles, que consiste en generar pequeñas perturbaciones al conjunto de condiciones iniciales o parametrizaciones físicas, de tal manera que cada perturbación resulta en un escenario distinto de dispersión, permite cuantificar la incertidumbre de la dispersión de la nube de ceniza.
Teniendo en cuenta esto, el objetivo de este trabajo es realizar un análisis de sensibilidad del modelo de dispersión FALL3D (Folch et al., 2021) utilizado en el VAAC Buenos Aires, para identificar las principales fuentes de incertidumbre durante la erupción del Volcán Láscar en diciembre 2022, con el fin de encontrar la mejor configuración para producir pronósticos por ensambles de dispersión para erupciones análogas.

Caso de estudio: Erupción volcán Lascar- Diciembre 2022

El volcán Láscar es un estratovolcán de 5592 m de altura, constituido por lavas andesíticas, situado en el norte de Chile, es considerado uno de los volcanes más activos de la Zona Volcánica Central (ZVC) (Smithsonian Institution), ha registrado cerca de 30 erupciones explosivas desde el siglo XIX. La actividad eruptiva histórica se ha caracterizado esencialmente por erupciones de tipo vulcanianas de corta duración de explosividad moderada (Índice de Explosividad Volcánica (IEV) entre 2-3), con emisión de ceniza fina y proyecciones balísticas en un radio de 5 km (Gardeweg et al., 1994). A destacar, la erupción de abril de 1993, corresponden al mayor evento volcánico ocurrido en el norte de Chile en tiempos históricos, la que alcanzó el IEV 4 en la escala IEV, con múltiples impactos tanto para la región de Chile como el sur de sudamérica debido a de la dispersión de ceniza que alcanzó el territorio Argentino y hasta Brasil afectando los vuelos de gran parte de Sudamérica (Matthews et al., 1997).
Para este estudio, se analizó el caso de la erupción del volcán Lascar ocurrida el 10 de diciembre del 2022, caracterizada por ser un pulso corto comenzando a las 15.36 UTC. El pulso eruptivo, superó los 6 km sobre el nivel del cráter (Sernageomin 2022), y la pluma de ceniza se dispersó en dirección sudoeste. En la Figura 2, se observa el producto RGB de ceniza (Quick Guide ASH RGB: Quick Guide), generado con los canales infrarrojos del satélite GOES 16, utilizado para la detección de presencia de ceniza volcánica en la atmósfera. En este caso, la detección de la ceniza por el RGB de cenizas fue difícil, ya que la señal de ceniza típicamente presenta tonos magenta pero dado que rápidamente se generó hielo, la pluma se observó en una tonalidad azul.

a) **b)** **c)**



 ISBN 978-987-1323-91-3

Figura 2. RGB de ceniza, realizado con datos del satélite GOES-16 para el 10 de diciembre del 2022 a las (a) 16:00, (b) 17:00 y (c) 18:00 UTC.

METODOLOGÍA

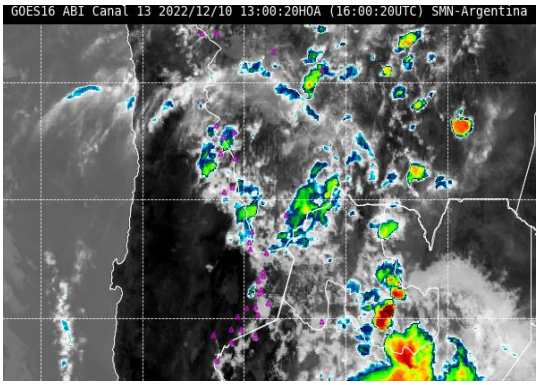
Para la realización de este trabajo, se utilizó el modelo de dispersión FALL3D, este es un modelo Euleriano tridimensional que resuelve la ecuación de advección, difusión y sedimentación para simular el transporte y depósito de partículas de tefra (Folch et al., 2021). El mismo permite simular también, la resuspensión de ceniza volcánica y polvo, la trayectoria de trazadores pasivos y el transporte de radionucleidos. En particular, para la resolución de este trabajo se empleó la versión 8.1 del modelo FALL3D, ya que a partir de la versión 8, el modelo cuenta con la posibilidad de generar pronósticos por ensambles.

El modelo requiere la entrada de datos meteorológicos y parámetros del término fuente (granulometría, flujo de masa, perfil de emisión, altura de columna, entre otros) para poder ejecutarlo. En este trabajo los datos meteorológicos los provee el modelo meteorológico Global Forecast System (GFS) (NCEP, 2015) que tiene una resolución de 0.25° y se dispone cada 6 horas en sus cuatro ciclos de actualización (00,06,12,18 UTC), para esta ocasión se utilizó el ciclo de las 06 UTC que era el ciclo que se encontraba disponible operativamente al momento de la erupción.

La granulometría se describe a partir de la distribución total de tamaño de partículas (TGSD), para este evento se estimó una TGSD, en base la clasificación por análogos de (Mastin et al, 2009) y utilizando las TGSD estimadas a partir de datos de campo (Costa et al, 2016). Como resultado se estimó una TGSD Bigaussiana, entre -8 a 14Φ. La primera moda presenta un sesgo hacia partículas de ceniza más fina (con media en 3.26 Φ con un desvío asociado de 1.27 Φ), y la otra hacia partículas de cenizas más gruesas (con media en -2.32 Φ con un desvío asociado de 1.86 Φ). Para la representación del flujo de masa (MFR), se utiliza el esquema de Woodhouse (Woodhouse et al, 2013), este esquema tiene en cuenta la interacción entre la columna eruptiva y los campos del viento en la zona de emisión. Para definir la distribución vertical del MFR, se utilizó el esquema de Suzuki (Pfeiffer et al., 2005) que asume una distribución tipo "hongo". Este esquema está representado por dos parámetros adimensionales, que determinan la forma del perfil de emisión, siendo A y L respectivamente. El parámetro A afecta a la posición en la vertical de la emisión máxima y el ancho de perfil, mientras que el parámetro L, afecta el ancho de la distribución alrededor de la altura de máxima emisión que se mantiene fija. Para este evento eruptivo se toman los valores de A= 4 y L=5.

Finalmente se estimó la altura máxima de la columna eruptiva (H), teniendo en cuenta la temperatura de brillo mínima del tope de la nube (Ver Fig. 3) en la banda de 10.3 μm y correlacionando con el perfil atmosférico sobre el volcán, teniendo en cuenta también la dirección y velocidad de dispersión de la pluma de ceniza volcánica. Dada la corta duración del pulso, se configuró al modelo FALL3D con una resolución espacial horizontal de 0.15° (al ser una pluma pequeña) y una resolución vertical de 1 km con un tope de 20 km, y una resolución temporal de 1 hora.

a)



b)

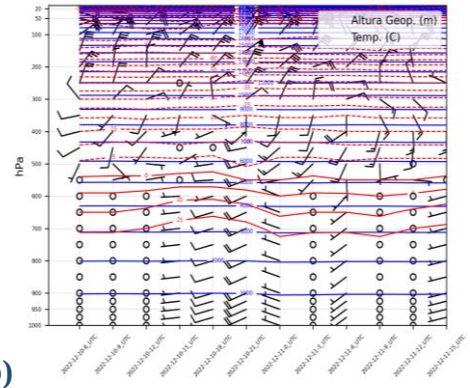


Figura 3. (a) Banda de 10.3 μm del satélite GOES-16 para el 10 de diciembre del 2022 a las 16:00 UTC y (b) perfil del viento sobre el volcán para distintas horas.

La fracción más fina de la granulometría (mayores a 4Φ), es la que tiene tiempos de residencia más largos produce los impactos más grandes desde el punto de vista de la aeronavegación, es por eso que aquí se evalúa la sensibilidad del modelo a los parámetros que controlan dicha fracción. Para el cálculo de la dispersión de la ceniza solo se tuvo en cuenta las partículas de cenizas más finas (mayores a 4Φ). En base a esto, se configuraron parámetros centrales (Tabla I) sobre los cuales se realizan perturbaciones, teniendo en cuenta un muestreo uniforme alrededor de los mismos. Se generaron experimentos, perturbando cada parámetro en diferentes magnitudes de manera independiente, dejando el resto de los parámetros fijos (Tabla II) para identificar los que tienen un mayor impacto en la dispersión del conjunto de simulaciones o ensamble.

Tabla I. Parámetros centrales con sus respectivos valores.

Altura (m)	Suzuki A	Suzuki L	Medias (Φ)	Desvío(Φ)
14450	4	5	-2.32 y 3.26	1.27 y 1.86

Tabla II. Esquema de perturbaciones para distintos parámetros del término fuente fuente indicando en porcentaje los valores de perturbaciones relativos al valor control y en valor absoluto las perturbaciones absolutas respecto del control.

Experimento	Altura(H)	Suzuki A	Suzuki L	Granulometría
1	10%			
2	20%			
3	30%			

 ISBN 978-987-1323-91-3

4		**1**		
5		**2**		
6		**3**		
7			**2**	
8			**3**	
9				**1**
10				**2**

En cada experimento, se obtuvieron distintos perfiles de emisión, en la Fig. 4 se presentan las distribuciones del flujo de masa para los experimentos 2, 5, 8 y 10, donde se perturbó la altura, el parámetro A de Suzuki y la granulometría respectivamente. Al variar la altura se obtienen grandes diferencias en los perfiles verticales de flujo de masa, asimismo la magnitud del flujo de masa aumenta significativamente. Mientras que al perturbar el parámetro A de Suzuki no se modifica el flujo de masa, pero si el perfil vertical afectando la inyección de masa en niveles inferiores. Finalmente, al perturbar la granulometría se varía la fracción fina de ceniza

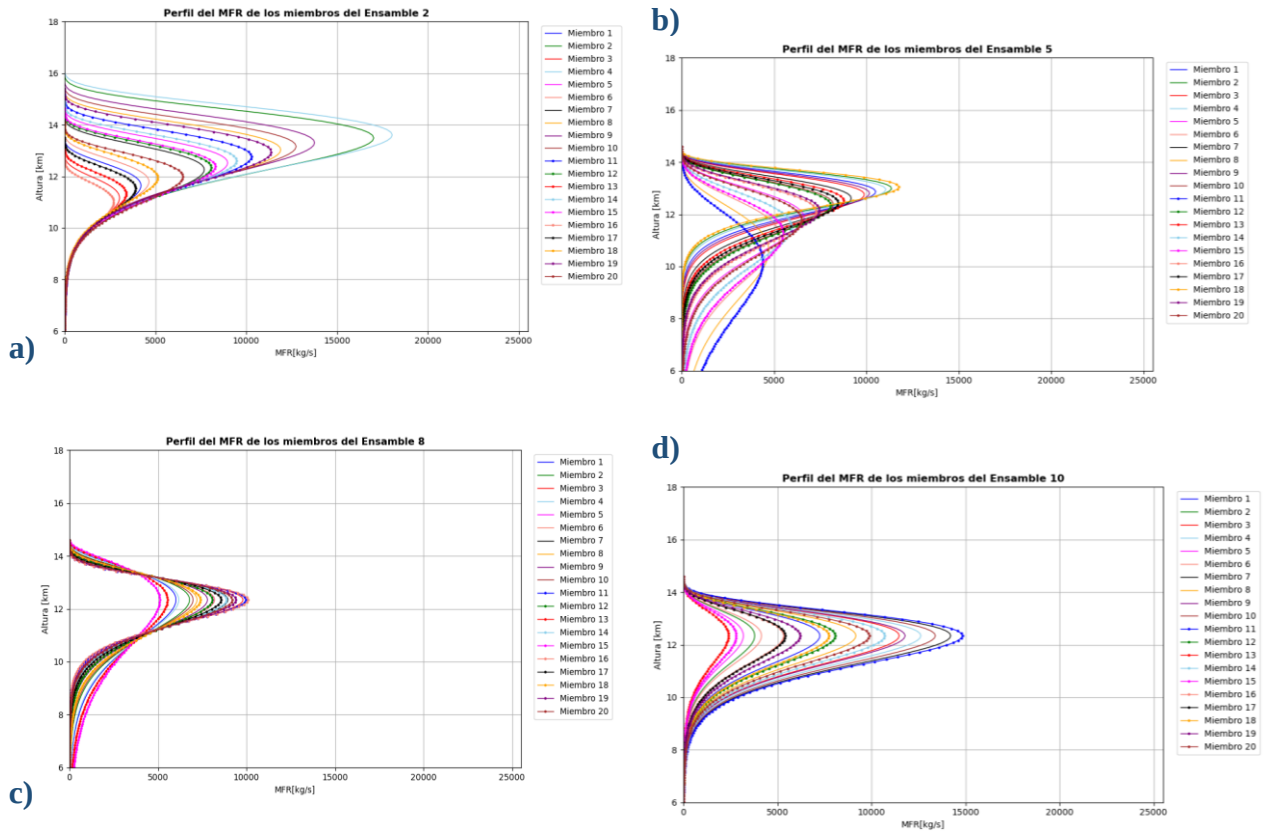


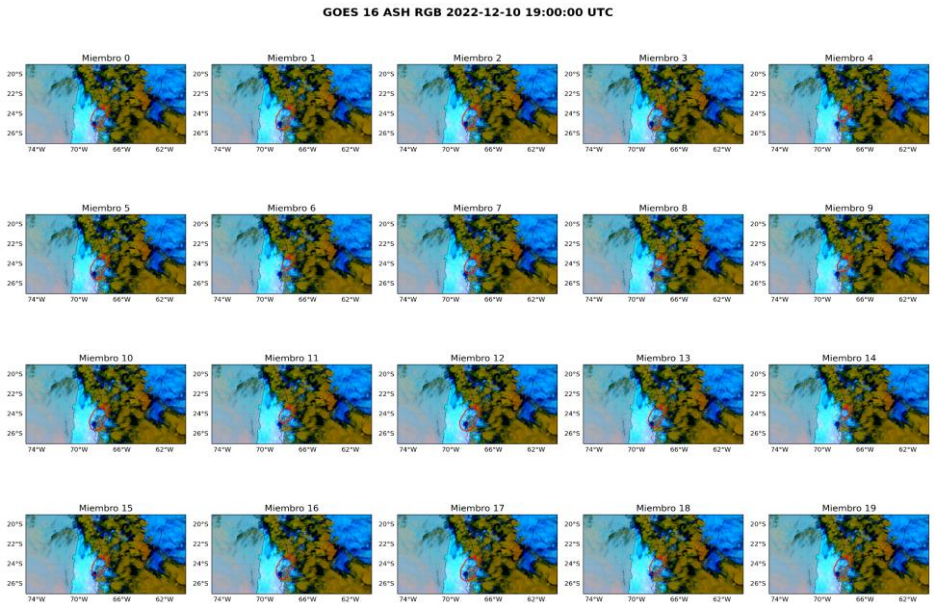
Figura 4. Perfiles verticales del flujo de masa perturbando (a) H en un 20% (b) Suzuki- A en 2 (c) Suzuki-L en 3 (d) media de la granulometría G en 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

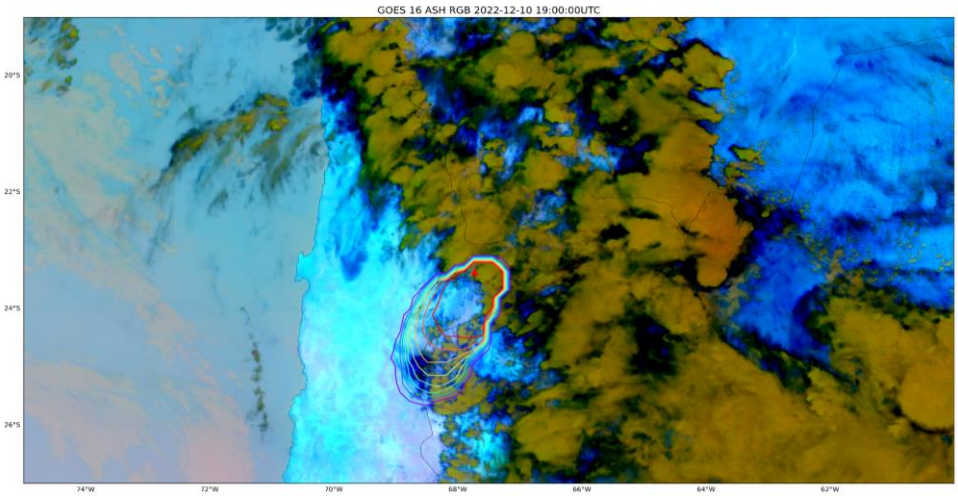
Perturbación: Altura

Se superpuso los resultados de carga de masa modelada perturbando la altura para un umbral de 0.2 g/m², siendo que este valor se considera que es el límite de detección satelital, y el producto RGB de ceniza generado a partir de los datos del satélite GOES 16. En la Figura 5 (a) se presentan los resultados de carga de masa de cada miembro del ensamble superpuestos con el RGB de cenizas y en la Figura 5 (b) se presenta la frecuencia relativa de superar el umbral de carga de masa de 0.2 g m-2 del ensamble respecto del RGB de cenizas. Individualmente los miembros generaron plumas de diferentes extensiones (Fig. 4 (a)) si se analiza la Fig. 4 (b) se observa con mayor claridad la presencia de la pluma de ceniza con hidrometeoros en tonos azules, pero al evaluar la frecuencia relativa de superar el umbral de 0.2 g/m² se observa que en sector sudoeste de la pluma modelada hay valores bajos de frecuencia relativa, esto se debe a que hay pocos miembros cumpliendo ese criterio en ese sector.

a)



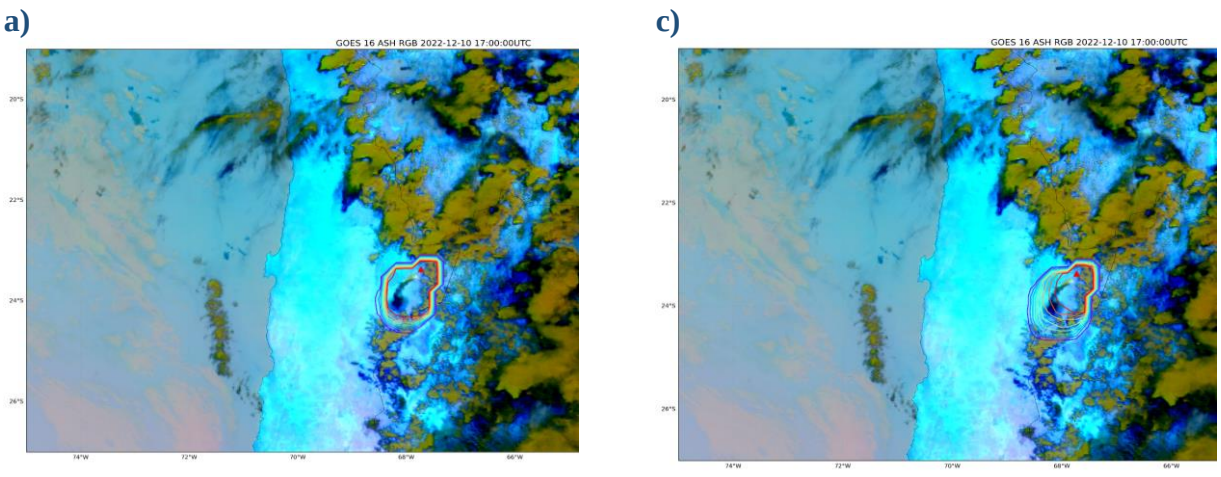
b)



 ISBN 978-987-1323-91-3

Figura 5. (a) Superposición de carga de masa para un umbral de 0.2 g/m²(curva roja) y RGB de ceniza, para cada miembro del experimento 3. (b) Superposición de la imagen satelital RGB con las curvas de probabilidad asociadas a superar el umbral de 0.2 g/m², para el mismo experimento. (contorno rojo alta probabilidad, azul baja probabilidad).

Si se analiza la frecuencia de superar el umbral de 0.2 g/m² para las 17:00 y 19:00 horas perturbando en un 10 y un 30% la altura, se pueden observar grandes diferencias (Fig. 6). Al contrastar ambos escenarios, se observa que, en ambos tiempos y perturbaciones, el modelo logra efectivamente contener la pluma. Sin embargo, al aumentar la magnitud de la perturbación en la altura, para ambos horarios, la pluma observada es contenida dentro de rangos de menor probabilidad, esto conlleva a una mayor incertidumbre asociada. Al profundizar en el análisis de los resultados para la perturbación de la altura en los dos porcentajes (10% y 30%), se evidencia que la variación es mucho mayor en el caso de la perturbación del 30% para ambos tiempos. Esto se debe a que se incluye un rango más amplio de alturas posibles y hay un cambio significativo en el flujo de masa debido a la fuerte dependencia que tiene con la altura, generando mayor variabilidad en la dispersión. Es particularmente interesante notar en este caso a las 19:00 UTC, que el modelo para ambas perturbaciones identifica áreas donde se esperaría encontrar ceniza con mayor posibilidad, pero estas no son evidentes en las imágenes satelitales, esto podría mejorarse reduciendo el tiempo de la emisión aunque no se descarta la existencia de ceniza en la atmósfera en dicha zona, mientras que sucede lo opuesto con el sector de mayor evidencia de ceniza, encontrando menores valores de frecuencia relativa.



b) **d)**

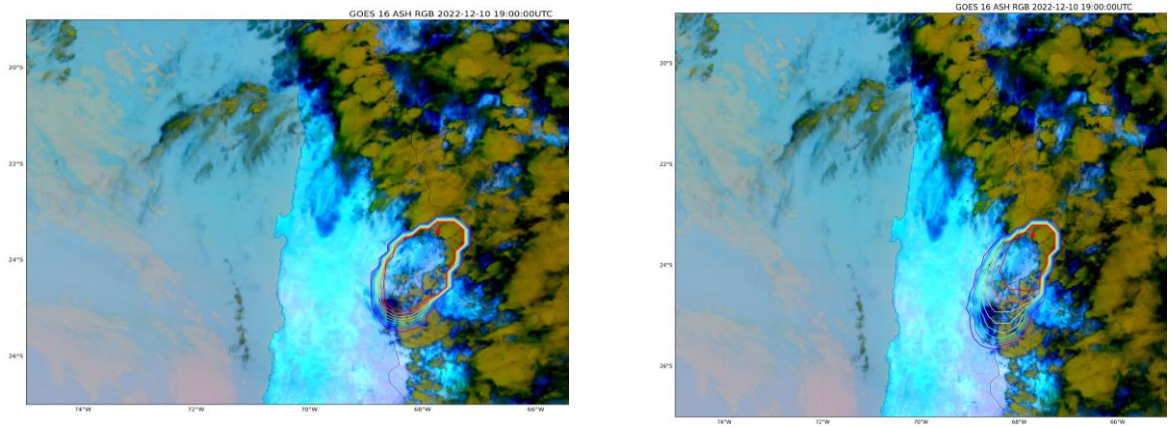
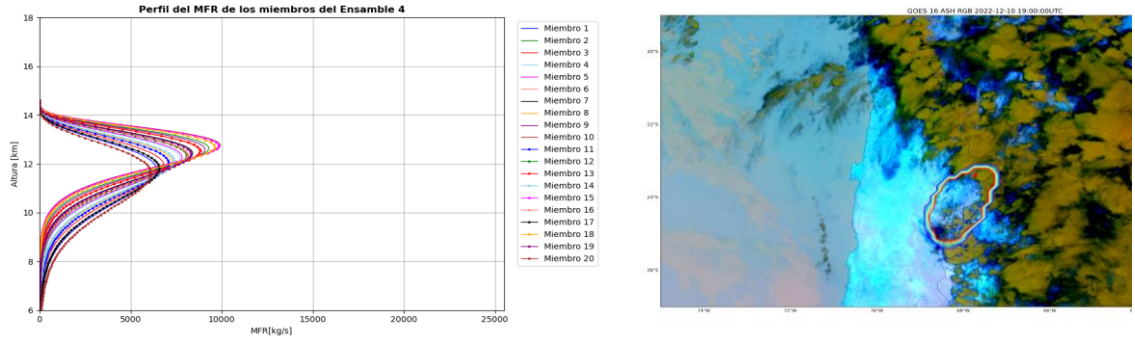


Figura 6. Superposición de la imagen satelital RGB de ceniza con las curvas de probabilidad asociadas a superar el umbral de carga de masa de 0.2 g/m2, para las 17:00 UTC considerando la perturbación de H en un (a) 10% y (c) 30% y para las 19:00 UTC considerando la perturbación de H en un (b)10% y (d) 30%.

Perturbación: Suzuki A y L

Al perturbar los parámetros de forma del perfil de emisión A y L de Suzuki, se obtienen diferentes perfiles de emisión, los resultados de los experimentos 4 y 7 que se muestran en la Fig. 7 (a) y (b). Al perturbar el parámetro A (experimento 4), se observa que aumenta la inyección de material en niveles inferiores, se reduce en los superiores y modifica la localización del pico de emisión. Mientras que la perturbación de L (experimento 7) cambia ligeramente la inyección en niveles superiores e inferiores, pero no modifica la localización de la máxima emisión. Los resultados del modelo de dispersión de las 19:00 UTC tras perturbar A y L se presentan en la Fig.7 (c) y (d) respectivamente. La perturbación de estos parámetros no exhibe casi variabilidad en las frecuencias relativas al perturbar uno u otro para este caso. Por lo tanto, no presentan una sensibilidad significativa y ninguno de los dos escenarios logra abarcar completamente la pluma observada.

a) **c)**



 ISBN 978-987-1323-91-3

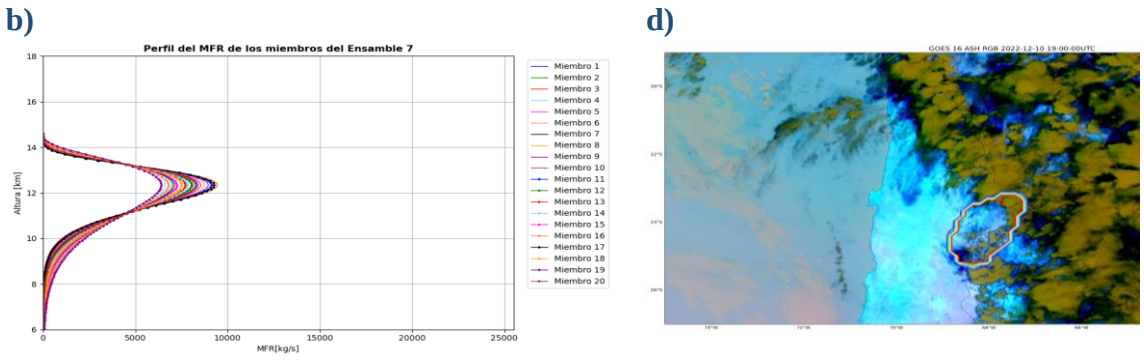


Figura 7. Perfiles de MFR para parámetros de Suzuki perturbados(a) A:1 y (b) L:2. Superposición de la imagen satelital RGB de ceniza con las curvas de probabilidad asociadas a superar el umbral de 0.2kg/m2 para parámetros de Suzuki perturbados (c) A:1 y (d) L:2

Perturbación: Media de la granulometría

Al perturbar la distribución granulométrica se generan cambios en la cantidad de ceniza inyectada en el perfil del flujo de emisión (Fig. 8), debido a que solo se considera el material emitido en el rango de cenizas finas es decir menor a 4Φ. Pero el impacto de esta perturbación fue poco, obteniendo un campo de frecuencias relativas con poca dispersión. Al estudiar la dinámica del viento en esta situación, se observaron condiciones de calma, lo que resultó en una variabilidad baja y una dispersión poco notable entre los miembros del ensamble. Es probable que esta variable adquiera mayor relevancia con el paso del tiempo. En este momento, pocas horas después del inicio de la erupción, parece tener un impacto relativamente menor. Asimismo, se evidencia que el modelo no logra contener por completo la pluma de ceniza observada.

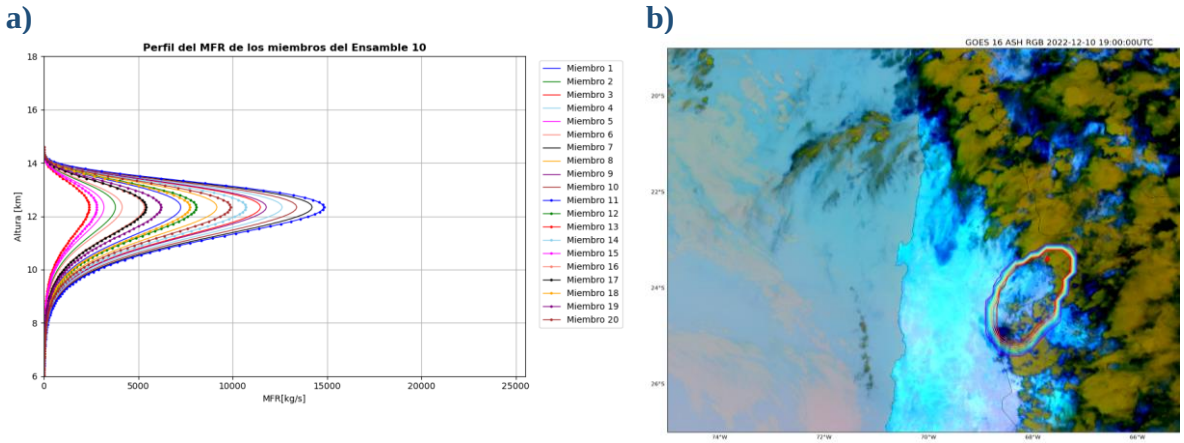


Figura 8. Perfil de MFR para la media de la granulometría perturbado 1 (a) y (b) Superposición de la imagen satelital RGB de ceniza con las curvas de probabilidad asociadas a superar el umbral de 0.2kg/m2 para el ensamble 10.

Búsqueda del mejor ajuste

Para concluir, una vez completadas todas las simulaciones de cada experimento, se propuso identificar el miembro que mejor se ajustaba a lo observado. Para este fin, se analizó la estructura tridimensional de la pluma de cada miembro, tal como se muestra en la Fig. 9 que se corresponde a la concentración por niveles de vuelo(son niveles verticales de interés para la aeronáutica donde la altitud nominal de una aeronave en cientos de pies es calculada utilizando la ecuación hidrostática considerando la presión de referencia como la presión media a nivel del mar en una atmósfera estándar, es decir 1013.25 hPa), para el miembro 10 del escenario con una perturbación del 30% en la altura. Para este miembro la pluma alcanzó mayores altitudes, llegando hasta FL500(~15000m), teniendo una mayor dispersión hacia el sudoeste entre FL300 (~9150 m) y FL500, mientras que en niveles menores se observó un estancamiento de la pluma, acorde a la situación de calma en niveles inferiores y vientos más intensos en niveles altos. Aquí se identificó que el nivel de 450 FL (~14000 m) para una perturbación del 30% en la altura era el que mejor se ajustaba a lo observado en la imagen satelital para este escenario (Fig. 6 (d)). Al parecer el esquema Suzuki no sería el adecuado para este tipo de erupciones vulcanianas que generan pulsos de corta duración ya que sobreestima la inyección de material en niveles bajos. Por consiguiente, será necesario evaluar otro tipo de parametrización, que represente mejor el perfil de emisión para capturar estos comportamientos.

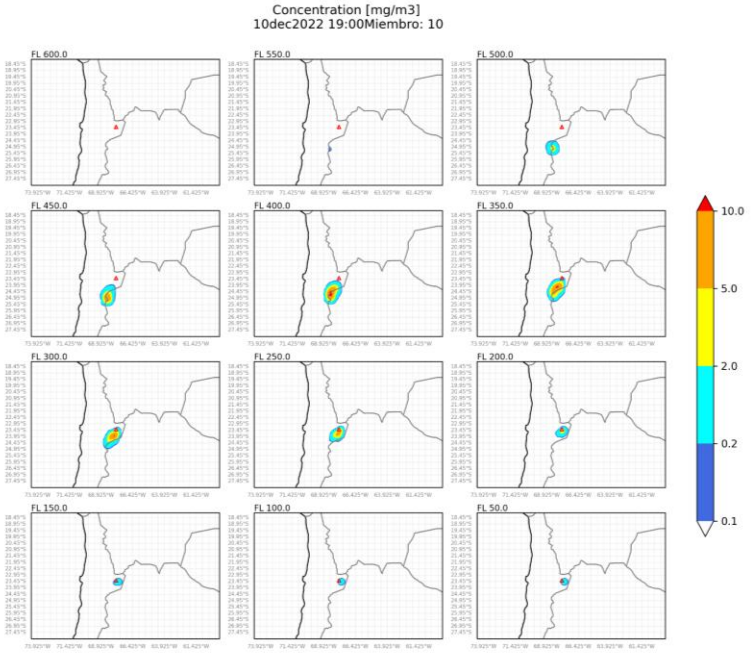


Figura 9. Paneles de concentración por FL para el miembro 10 del experimento 3, correspondiente a la perturbación de H:30% para las 19:00 UTC.

CONCLUSIONES

En este estudio, se ha realizado una evaluación de la sensibilidad del modelo FALL3D 8.1, variando diversos parámetros del término fuente, utilizando como caso de estudio la erupción del volcán Lascar en diciembre de 2022. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, se aplicó una estrategia que consistió en perturbar cinco parámetros significativos del término fuente: altura de la columna eruptiva, distribución total del tamaño de partícula (TGSD), parámetros de Suzuki A y L, y granulometría, dado su

impacto relevante en la dispersión de la nube de ceniza. Estos parámetros se ajustaron a partir de valores estimados mediante diversas técnicas de investigación.

Al analizar la sensibilidad del modelo a la variación de los parámetros, se encontró que algunos, como la altura y la granulometría, muestran una sensibilidad considerable en las simulaciones de dispersión, mientras que otros, como los parámetros de la forma del perfil de emisión A y L de Suzuki, exhiben menos variabilidad en los resultados para este evento en particular. Específicamente, se identificó que las variaciones en la altura muestran la mayor sensibilidad en los resultados, lo que impacta significativamente en la dispersión de la ceniza, aumentando la incertidumbre asociada. Las perturbaciones en otros parámetros también pueden influir en la dispersión, aunque en menor medida.

Con el fin de identificar la simulación que más se aproximaba a lo observado se analizó la estructura vertical de cada simulación, y se encontró que el experimento 3, fue la que mejor representó la observación satelital, considerando una perturbación del 30% en la altura. Por otro lado, se identificó que la caracterización del perfil de emisión utilizando el esquema Suzuki tendió a sobreestimar la dispersión del material en niveles bajos. Lo que sugiere explorar otros esquemas de perfiles de emisión, especialmente diseñados para eventos de corta duración, como el caso tratado en este trabajo.

Este trabajo proporciona una base para dirigir y mejorar la selección de parámetros para la generación de ensambles de dispersión de manera óptima. En particular es necesario realizar más estudios de sensibilidad en situaciones similares y explorar alternativas que permitan una representación más precisa de la dispersión de materiales en eventos vulcanianos. Los avances en estas líneas de trabajo contribuirán a mejorar la representación de los modelos para una mejor gestión del riesgo volcánico.

REFERENCIAS

Alexander, David. Volcanic ash in the atmosphere and risks for civil aviation: a study in European crisis management. International Journal of Disaster Risk Science, 2013, vol. 4, p. 9-19.

Beckett, Frances M., et al. Atmospheric dispersion modelling at the London VAAC: A review of developments since the 2010 Eyjafjallajökull volcano ash cloud. Atmosphere, 2020, vol. 11, no 4, p. 352.

Costa, Antonio; Pioli, Laura; Bonadonna, Costanza. Assessing tephra total grain-size distribution: Insights from field data analysis. Earth and Planetary Science Letters, 2016, vol. 443, p. 90-107.

Clarkson, Rory J.; Majewicz, Elizabeth JE; Mack, Peter. A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, vol. 230, no 12, p. 2274-2291.

Elissondo, Manuela, et al. Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, vol. 16, no 3, p. 675-704.

Folch, Arnau; Mingari, Leonardo; Prata, Andrew T. Ensemble-based forecast of volcanic clouds using FALL3D-8.1. Frontiers in Earth Science, 2022, vol. 9, p. 741841.

Gardeweg, M. C.; Sparks, R. S. J.; Matthews, S. J. Evolution of Lascar volcano, northern Chile. Journal of the Geological Society, 1998, vol. 155, no 1, p. 89-104.

Matthews, Stephen J.; Gardeweg, Moyra C.; Sparks, R. Stephen J. The 1984 to 1996 cyclic activity of Lascar Volcano, northern Chile: cycles of dome growth, dome subsidence, degassing and explosive eruptions. Bulletin of Volcanology, 1997, vol. 59, p. 72-82.

Mastin, Larry G., et al. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2009, vol. 186, no 1-2, p. 10-21.

Osores, María Soledad. (2018). Evaluación de estrategias para el pronóstico numérico por ensambles de dispersión de ceniza volcánica en Sudamérica. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Pfeiffer, T.; Costa, A.; Macedonio, G. A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2005, vol. 140, no 4, p. 273-294.

Reporte especial de actividad volcánica (REAV), Sernageomin 2022

Woodhouse, M. J., et al. Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, vol. 118, no 1, p. 92-109.

EXPLORACIÓN DE DATOS GEOESPACIALES DE CALIDAD DE AIRE EN LA CUENCA DEL RÍO RECONQUISTA. PROVINCIA DE BUENOS AIRES.ARGENTINA.

Mondelo, Virginia [a], Mazzucchelli, Gabriela [a], Jelinski, Guillermo[a], Pontoriero, Aylén[a] y Gaspari Fernanda J.[b]

[a] *Dirección General Ejecutiva del Comité de Cuenca del Río Reconquista (COMIREC).*
[b] *CEIDE. FCAyF-UNLP. ARGENTINA.*

e-mail: unidad.gestion@minfra.gba.gov.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicación de la Plataforma de datos geoespaciales Giovanni, desarrollada por la NASA, con el propósito de analizar y visualizar datos satelitales relacionados con la calidad del aire. Se definió como área de estudio la cuenca del río Reconquista. El sistema Giovanni facilita el acceso y la exploración de datos como la concentración de contaminantes atmosféricos, aerosoles y gases. Para este trabajo se enfoca el uso de la herramienta para la visualización y análisis de parámetros geofísicos, como ser dos gases altamente perjudiciales para la salud humana: el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el material particulado. Los datos procesados provenientes del sensor OMI a bordo del satélite AURA, se emplean para medir el NO_2, mientras que para evaluar el material particulado se recurre a información del sensor MODIS a bordo del satélite AQUA. De este último se obtiene un producto denominado Profundidad Óptica de Aerosoles (Aerosol Optical Depth o AOD), que sirve como indicador del material particulado en la superficie. Al seleccionar el tipo de dato a analizar y definir los parámetros temporales y geográficos de interés, se generan mapas y gráficos que facilitan la comprensión de patrones y tendencias en relación con la calidad del aire, en forma diaria, mensual hasta anual. Se concluye que esta herramienta permite por medio de la teledetección, llevar a cabo un monitoreo a nivel regional que sirve como instrumento para la gestión territorial. Además, resulta muy útil en la identificación y en la detección de áreas con altos niveles de contaminación del aire, a nivel del suelo, donde las personas viven y respiran.

Palabras Clave: Calidad de Aire, Río Reconquista, Teledetección.

INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más interconectado y consciente de los desafíos ambientales, la calidad del aire se ha convertido en un tema de preocupación global. La creciente urbanización, la industrialización y el aumento de la movilidad de la población han contribuido a la emisión de contaminantes atmosféricos que tienen un impacto directo en la salud de las personas y el medio ambiente. La exposición prolongada a partículas finas ($PM_{2.5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y otros contaminantes del aire puede tener efectos perjudiciales en la salud humana, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además de contribuir al cambio climático. En este contexto, la monitorización y mejora de la calidad del aire se han convertido en una prioridad para gobiernos, científicos y ciudadanos conscientes de la importancia de mantener un entorno respirable y saludable.

La tecnología de detección remota a través de satélites, con su capacidad de proporcionar una visión global y continua de la atmósfera, ha emergido como una herramienta poderosa en la lucha contra la contaminación del aire.

GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization and ANalysis Infrastructure) es una herramienta desarrollada por la NASA (National Aeronautics and Space Administration – USA) que proporciona acceso a datos satelitales y modelos climáticos para su visualización, análisis y descarga. Los datos disponibles a través de GIOVANNI incluyen información sobre la atmósfera, la oceanografía, la meteorología, la química atmosférica y otros campos de estudio relacionados con las ciencias de la Tierra.

En el presente trabajo se expone la utilización de la herramienta Giovanni desarrollada por la NASA para analizar y visualizar datos satelitales sobre de calidad del aire sobre la Cuenca del Rio Reconquista, provincia de Buenos Aires, Argentina.

A continuación, se presenta una descripción sobre la adquisición de datos a partir de información satelital sobre contaminantes atmosféricos, cómo se procesan estos datos en la plataforma Giovanni y cómo los resultados proporcionan información valiosa para la toma de decisiones, la implementación de políticas ambientales y la protección de la salud pública.

¿QUÉ SON LOS DATOS SATELITALES?

Los datos satelitales proporcionan información valiosa sobre la calidad del aire al monitorear diversos componentes atmosféricos y factores relacionados. Algunos de los datos que los satélites pueden ofrecer incluyen: Concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Concentración de Ozono (O_3), Material Particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), Aerosoles Atmosféricos, Emisiones de Incendios Forestales y Quemas Agrícolas, Datos Meteorológicos y de Viento, entre otros.

Este trabajo se ha enfocado en dos de los contaminantes considerados más nocivos para el ser humano que son la Concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y el Material particulado (PM).

- √ El *dióxido de nitrógeno (NO_2)* es un gas contaminante atmosférico que se origina principalmente a partir de la quema de combustibles fósiles y actividades industriales. Para este trabajo se ha utilizado datos del sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo del satélite Aura de la NASA, que mide la concentración de NO_2 en la tropósfera. El sensor OMI es un espectrómetro de dispersión con una resolución espacial de aproximadamente 13x24 kilómetros y una alta precisión en la detección de NO_2, permitiendo un monitoreo detallado que ayuda a identificar fuentes de contaminación, cambios en la contaminación generada por los combustibles fósiles, y evaluar la calidad del aire en áreas urbanas y regiones industriales.
- √ El *material particulado (PM)* se refiere a partículas minúsculas en suspensión en la atmósfera, que incluyen partículas finas ($PM_{2.5}$) y partículas más grandes (PM_{10}). Los datos utilizados son del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA. Éstos estiman la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} midiendo la cantidad y la dispersión de la luz solar reflejada por estas partículas. El sensor MODIS es un espectrorradiómetro con una resolución espacial de aproximadamente 250 metros a 1 kilómetro, lo que le permite capturar datos de calidad del aire a nivel global.

ZONA DE ESTUDIO

El Río Reconquista, se ubica al noreste bonaerense y abarca administrativamente 18 partidos del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) y de zonas rurales cercanas. Limita al norte con la cuenca del río Luján; al sur con la cuenca del río Matanza-Riachuelo y su desembocadura en el Río de la Plata. Cuenta con una unidad de gestión territorial denominada Comité de la Cuenca Reconquista (COMIREC), dependiente de la subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Buenos Aires, que es un ente autárquico que coordina y ejecuta acciones vinculadas con el saneamiento ambiental, la preservación del recurso hídrico y la mejora de la calidad de vida de sus habitantes (Fig. 1) (https://www.gba.gob.ar/comirec).

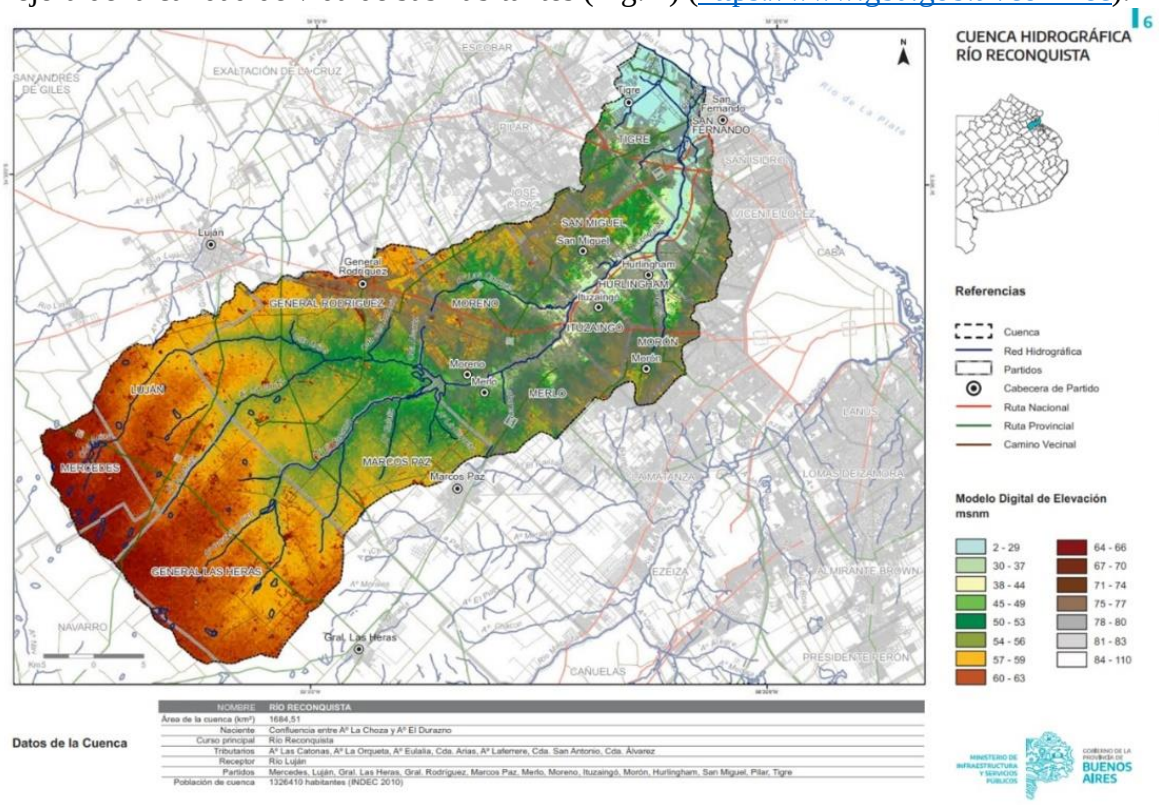


Figura 1. Cuenca Río Reconquista y modelo digital de elevación. Fuente: Atlas de cuencas y regiones hídricas y ambientales de la provincia de Buenos Aires (2020)

METODOLOGÍA

La herramienta Giovanni está disponible en https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni. Estos productos son especialmente útiles para la investigación y el análisis climático, ya que ofrecen una visión global de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo y el espacio. Para su uso, con usuario predefinido, se debe ingresar a la plataforma y seleccionar el producto de datos de interés.

Los datos espaciales se organizan en niveles de acuerdo con su nivel de procesamiento:

- Nivel 0 son datos crudos o sin procesar generados por los instrumentos de observación.
- Nivel 1 son datos calibrados y corregidos que se derivan de los datos de nivel 0.
- Nivel 2 son datos georreferenciados y procesados que se derivan de los datos de nivel 1.

- Nivel 3 son productos que se obtienen a partir de datos de nivel 2 y se agregan y promedian para proporcionar información más global y a largo plazo.

Los productos de nivel 3 se presentan en forma de cuadrícula, y cada celda de la cuadrícula representa una ubicación en la superficie de la Tierra con un valor único. El tamaño de las cuadriculas determina la resolución espacial y esto depende exclusivamente del sensor.

En este trabajo, se han utilizado productos de Nivel 3 para el análisis de NO_2 y PM.

Para el NO_2 se utilizó el producto "*NO_2 de Columna troposférica"* que proporciona datos sobre la concentración de NO_2 en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, donde el NO_2 tiene un mayor impacto en la calidad del aire y salud humana.

Para el material particulado, se utilizó el producto *"Aerosol Optical Depth (AOD*)" que ofrece una estimación cuantitativa de la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera, desde la superficie terrestre hasta la cima de la atmosfera. El AOD es una cantidad adimensional, con valores que generalmente varían entre 0 y 1, y puede utilizarse como indicador de la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en la superficie.

Una vez seleccionado el producto, se define la región de interés. En este trabajo, se enfocó en la zona que ocupa la Cuenca Río Reconquista, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Por último, se especifica el periodo de estudio, estableciendo las fechas de inicio y finalización, y, se selecciona el tipo de gráfico deseado como reporte. Para ambos contaminantes, se optó por el "Gráfico de Promedio de Tiempo (Time Averaged Plot)", que permite visualizar y analizar datos temporales promediados y resulta muy útil para examinar las concentraciones de contaminantes atmosféricos. La herramienta calcula el promedio de los valores de datos para la región y el período seleccionados. Como resultado final, se obtuvieron mapas de concentración de NO_2 y AOD sobre la Cuenca Rio Reconquista.

RESULTADOS

En la Fig. 2, se representa la concentración de NO_2 (en moléculas/cm^2) desde la superficie terrestre hasta la parte superior de la troposfera. La imagen representa la distribución promedio de 30 días en noviembre de 2022.

El análisis de estos datos confirma que la medición de NO_2 por OMI es un indicador efectivo de los niveles de NO_2 en la superficie, permitiendo la identificación de características a escala local y regional con alta resolución, incluyendo importantes áreas urbanas. Estas últimas generan que los valores de NO_2 alcancen su máximo en la cuenca media y disminuyendo hacia el oeste, donde predomina la ruralidad.

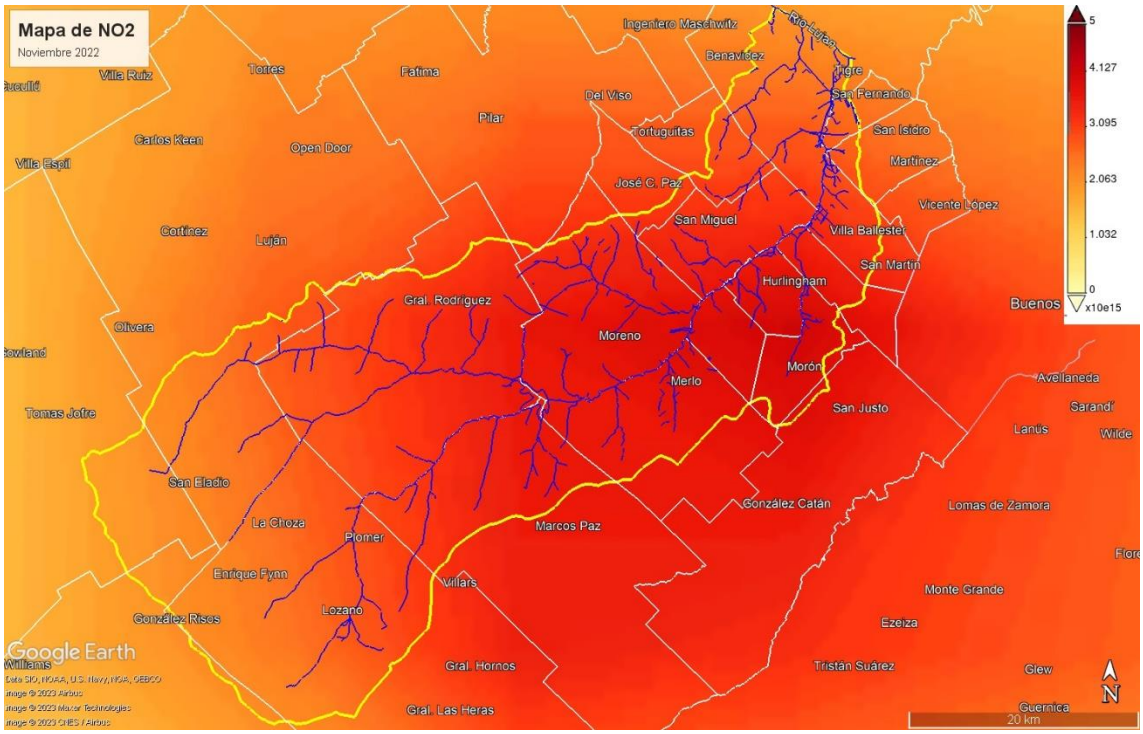


Figura 2. Mapa de concentración de NO_2 del mes de noviembre de 2022 obtenido de Giovanni cargado de Google Earth con límites de la cuenca Río Reconquista.

En la Fig. 3, se representan los mapas de distribución de la concentración de NO_2 del mes de Abril de los años 2019, 2020 y 2021 en la Cuenca del Rio Reconquista. Se observa una clara disminución de concentración de NO_2 entre el mapa de Abril del 2019 y el mapa de Abril del 2020. Algunas de las reducciones más altas ocurrieron en áreas densamente pobladas y posiblemente, puede deberse, al confinamiento estricto a causa de la pandemia de COVID-19. Luego en 2021, se interpreta un nuevo aumento de concentración de NO_2.

Esta secuencia permite concluir que las imágenes satelitales que proporciona el sensor OMI de NO_2 otorgan un monitoreo de los cambios en la contaminación generada por los combustibles fósiles, detectando emisiones de focos puntuales, lo cual resultan de gran ayuda para analizar características a escala local / regional a lo largo del tiempo.

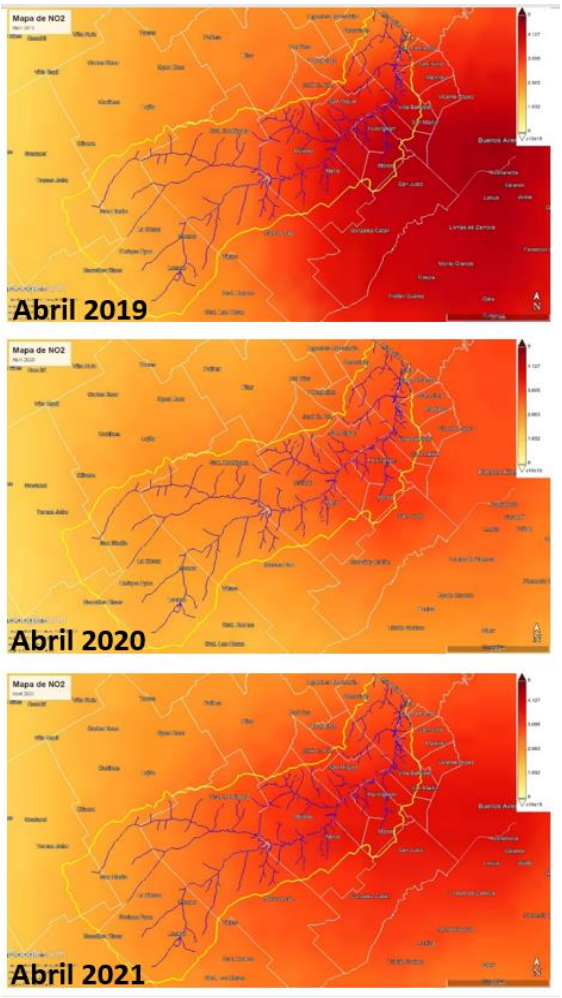


Figura 3. Mapa de concentración de NO_2 del mes de Abril de los años 2019, 2020 y 2021 en la Cuenca del Rio Reconquista.

En el estudio de la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en la superficie, representado con el Mapa de AOD (Fig. 4), se visualiza la cantidad de AOD (de 0 a 0.35) desde la superficie terrestre hasta la parte superior de la atmosfera. Un AOD alto suele indicar una mayor concentración de partículas en suspensión.

La Fig. 4 es un promedio este material de un periodo de 28 días durante el mes de Febrero del 2023, en el cual se interpreta una mayor concentración en el área urbanizada de la cuenca media y baja. La zona rural de la cabecera de cuenca (al oeste) la distribución de PM es leve a nula. Del mapa obtenido se demuestra la distribución de la concentración de partículas suspendidas que se capturan y las características a escala local y regional.

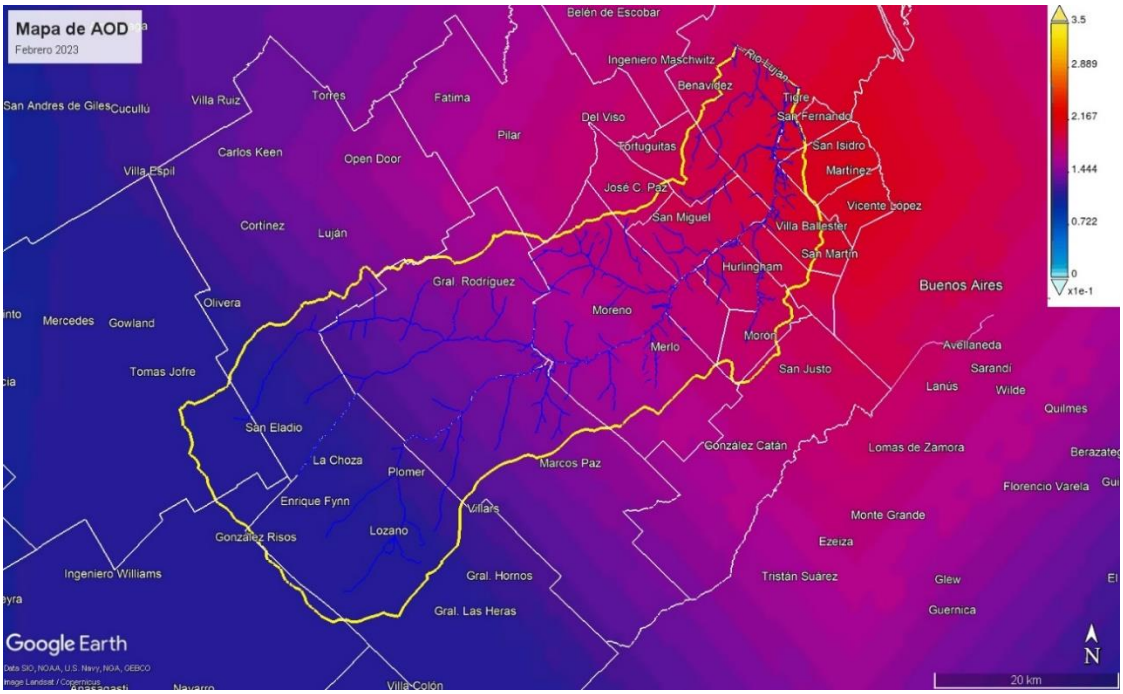


Figura 4. Mapa de concentración de Material Particulado del mes de Febrero de 2023 obtenido de Giovanni cargado de Google Earth con límites de la cuenca Río Reconquista.

CONCLUSIONES

Los satélites y sensores se revelan como herramientas efectivas para la recopilación de datos ambientales y de calidad de aire, y la creación de mapas que ofrece la plataforma Giovanni permite su monitorización constante y la investigación atmosférica en tiempo real y a nivel regional.

Los resultados fueron mapas mensuales que muestran la concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y de material particulado (PM) en la zona de la Cuenca Río Reconquista. Estos mapas ofrecen una valiosa herramienta para evaluar la calidad del aire, identificar fuentes de contaminación atmosférica y rastrear patrones de transporte de partículas de aerosol. Además, ofrecen una visión más completa de la calidad del aire en la cuenca, permitiendo la identificación de patrones de contaminación a gran escala.

En resumen, este trabajo representa una primera aproximación al estudio de la calidad del aire en la Cuenca del Río Reconquista.

REFERENCIAS

Atlas de cuencas y regiones hídricas y ambientales de la provincia de Buenos Aires (2020). Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos. PBA. Argentina. 31pp. Disponible en: https://www.ada.gba.gov.ar/web_doc/gis/Atlas%20Cuencas%20-%20Etapa%20I.pdf

Applied Remote Sensing Training (ARSET) https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset

Follette-Cook, M.; Prados, A.; Gupta, P (2020) *Un vistazo a cómo la nasa mide la contaminación del aire* https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/spanish/arset-un-vistazo-como-la-nasa-mide-la-contaminacion-del-aire

Herramienta GIOVANNI https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA GEOESPACIAL CON GEOQ DE ESCENARIOS PLUVIALES EXTREMOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RECONQUISTA. BUENOS AIRES, ARGENTINA

Mondelo, Virginia [a], Mazzucchelli, M.Gabriela [a] , Jelinski, G. [a] y Gaspari Fernanda J.[b]

[a] Dirección General Ejecutiva del Comité de Cuenca del Río Reconquista (COMIREC).
[b]CEIDE. FCAyF-UNLP. ARGENTINA.

e-mail: unidad.gestion@minfra.gba.gov.ar

RESUMEN

El almacenamiento y procesamiento de información georreferenciada a través un Sistema de Información Geográfica representa un gran avance en la planificación del uso y conservación los recursos, conformando una herramienta de geoprocesos espacio-temporal para la obtención de nueva información útil para el análisis de la hidrología de superficie. En la actualidad, modelos geoespaciales que utilizan información georreferenciada, permiten y facilitan el procesamiento de variables hidrológicas, como escurrimiento-infiltración, las cuales pueden ser automatizadas por medio de geoprocesos, aplicando por ejemplo el método de cálculo de lámina de escurrimiento denominado número de curva (NC). En el presente trabajo se expone como objetivo, la modelización hidrológica de 4 escenarios pluviales, en la cuenca alta del río Reconquista. Para ello, se ha utilizado la herramienta de procesamiento automático geoespacial GeoQ que calcula escurrimiento superficial, bajo entorno QGis®, aplicando NC, combinando el grupo hidrológico de suelo según textura, tipos de usos del suelo, según la condición normal de humedad antecedente. Los eventos pluviales en formato imágenes raster, fueron obtenidos del sistema operativo PERSIANN (Estimación de Precipitación a partir de Información de Detección Remota usando Redes Neuronales Artificiales) desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Detección Remota (CHRS-UCI-USA) disponibles en la base de datos web satelital, considerando tormentas de tipo erosivo, es decir eventos pluviales mayores a 12,7 mm/h, analizadas de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional. La modelización geoespacial GeoQ permitió representar el coeficiente de escurrimiento/infiltración por escenario y la respuesta suelo-vegetación, reflejando también el efecto de la intensidad pluvial. Los resultados encontrados aportan al modelamiento de la escorrentía en una cuenca de llanura, siendo relevante para evaluar el comportamiento hidrológico ante diversos eventos pluviales modales, aportando a la planificación del territorio y la detección de posibles zonas que puedan sufrir de inundaciones y causar daños a la población de la región.

Palabras Clave: GeoQ, eventos pluviales, río Reconquista, Teledetección.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación del escurrimiento superficial es importante en los procesos de erosión hídrica superficial de los suelos, la cual genera fragilidad en los sistemas ambientales, por ello se han desarrollado diferentes métodos paramétricos que utilizan fórmulas empíricas basadas en datos experimentales que permiten determinar el escurrimiento en las cuencas de recepción (Gaspari et al, 2019). En base al conocimiento de la dinámica del ciclo hidrológico, se expresa que cuando comienza a llover, una parte del agua precipitada queda retenida en la vegetación (abstracciones (Io)), otra inicia el proceso de infiltración (F) y el resto genera

escurrimiento (Q). A medida que transcurre la precipitación, el proceso de infiltración tiende a saturar el suelo, y el escurrimiento tiende a aumentar. De ello, se deduce, que la precipitación se distribuye contemplando la intensidad y duración de la tormenta, el tipo de suelo y cobertura vegetal y/o uso del suelo del área o cuenca hidrográfica analizada (Gaspari et al, 2019).

La modelación de la relación precipitación – escurrimiento en diferentes escenarios pluviales según el uso del suelo actual y grupo hidrológico de suelo se inicia con el análisis de los registros pluviométricos, lo cual permite definir la variabilidad temporal de las precipitaciones anuales y determinar los períodos correspondientes a los escenarios estudiados.

En la actualidad, modelos geoespaciales que utilizan información georreferenciada, permiten y facilitan el procesamiento de variables hidrológicas, como escurrimiento-infiltración, las cuales pueden ser automatizadas por medio de geoprocesos, aplicando por ejemplo el método del SCS de EEUU, para el cálculo de la lámina de escurrimiento superficial, denominado número de curva (NC).

La modelación con el complemento geoespacial GeoQ establece la representación geoespacial del funcionamiento hidrológico de una cuenca, obteniendo cartografía de la lámina de escurrimiento promedio anual a partir de la zonificación espacial automática del NC, para los escenarios de uso del suelo definidos, estableciendo los coeficientes de escurrimiento, infiltración y abstracciones correspondientes (Montealegre Medina y Gaspari, 2019; 2021). Es importante mencionar que el almacenamiento y procesamiento de información georreferenciada a través un Sistema de Información Geográfica (SIG) representa un gran avance en la planificación del uso y conservación los recursos, conformando una herramienta de geoprocesos espacio-temporal para la obtención de nueva información útil para el análisis de la hidrología de superficie, conformando una base de datos hidrológica-ambiental.

El NC establece que cada uno de los complejos integrado por las características texturales del suelo y la vegetación de cada unidad de territorio, se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En cada uno de estos complejos suelo-vegetación de NC, la precipitación generará diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo. Además, este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Gaspari et al 2009; Gaspari et al, 2019).

En el presente trabajo se expone como objetivo, la modelización hidrológica de cuatro escenarios pluviales, en la cuenca alta del río Reconquista (CARR). El estudio presenta el modelado hidrológico de la CARR, que conforma una herramienta clave para comparar los escenarios de gestión y el cambio climático en cuencas hidrográficas, aplicando el GeoQ, que es un modelo hidrológico que se integra a interfase SIG para estimar el escurrimiento superficial aplicando metodologías reconocidas, como ser el número de curva (NC). Esta versión del modelo requiere mapas de uso del suelo y grupos hidrológicos para calcular el escurrimiento medio anual, a partir de una base de datos de precipitaciones diarias del área en estudio.

METODOLOGÍA

La CARR se ubica en la región de la Pampa húmeda bonaerense, comprende llanuras con un relieve muy suave, cuya pendiente media es 0,25 por mil, con cotas de 70 msnm que decrecen hacia el este. Esta topografía plana y su geomorfología particular favorece al anegamiento de grandes áreas, que, sumado a la intervención antrópica, que contribuye a reducir y modificar el escurrimiento del agua, generando el incremento de la problemática de inundaciones (https://www.gba.gob.ar/comirec) (Fig. 1).

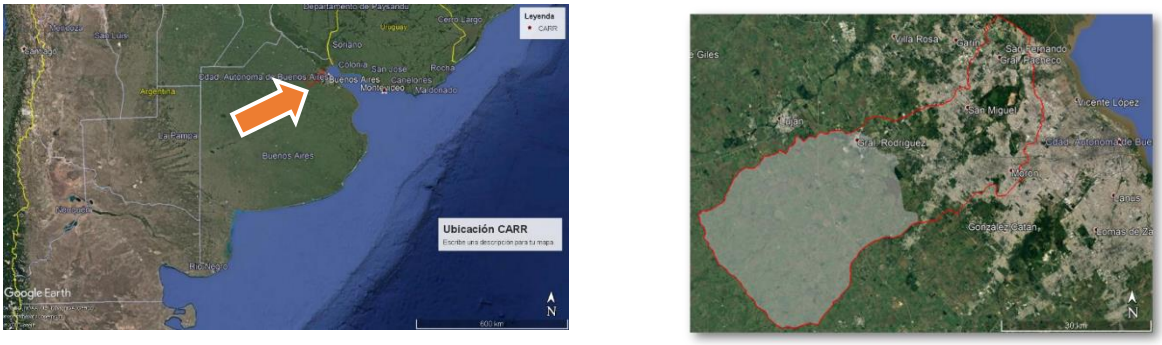


Figura 1. Ubicación regional de la CARR (izquierda) - Ubicación de la CARR (sombreado) y el Río Reconquista (color rojo) (derecha).

Para ello, se ha utilizado la herramienta de procesamiento automático geoespacial GeoQ que calcula escurrimiento superficial, bajo entorno QGis®, aplicando el método NC, combinando información sobre el grupo hidrológico de suelo según textura superficial, tipos de usos del suelo y definido para una condición normal de humedad antecedente.

Con base en la dinámica del ciclo hidrológico, el GeoQ permite conocer la geodistribución de sus respectivos coeficientes, que expresan el porcentaje que conforma cada factor con respecto a la precipitación total, como se muestra en la Fig. 2, siendo CE el coeficiente de escorrentía, CIo el coeficiente de abstracciones iniciales y CF el coeficiente de infiltración.

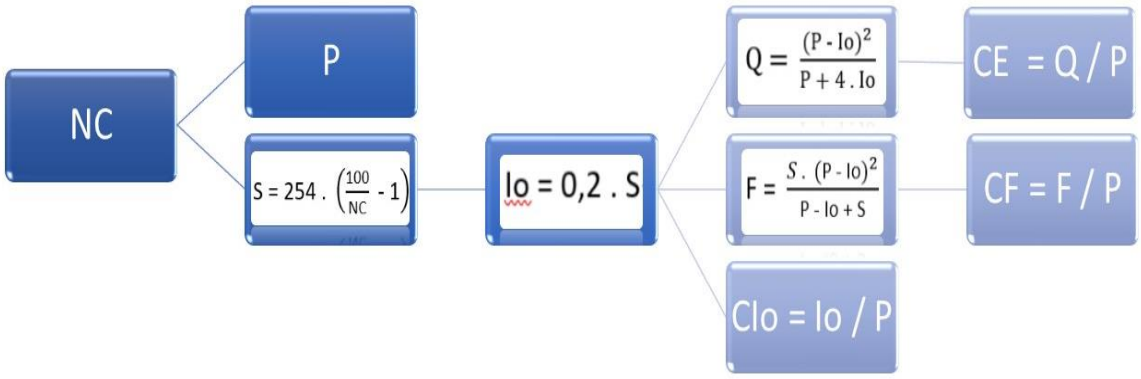


Figura 2. Entorno gráfico de la modelación espacial del método NC.

Siendo NC número de curva; P Precipitación; Io abstracciones iniciales; Q escurrimiento; F infiltración; CE coeficiente de escorrentía; CIo coeficiente de abstracciones iniciales y CF coeficiente de infiltración.

Por consecuencia, el porcentaje total de precipitación P (%) está dado por la sumatoria de CE, CIo y CF (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari et al., 2009, Montealegre Medina y Gaspari, 2023).

Los datos de inicio para la aplicación del GeoQ, por el método NC, para el cálculo del escurrimiento superficial necesita la zonificación de cada complejo suelo vegetación en la CARR, los cuales se identificaron según:

1. La distribución del grupo hidrológico de suelo (GH) se adaptó según denominación del Servicio de Conservación de Suelos de EEUU a los que asignó una capacidad de infiltración según la textura, estructura y posición en el terreno (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1994);.

2 El mapa de caracterización y zonificación de la cobertura vegetal y uso del suelo (VU).

3. La condición de humedad antecedente del suelo (CHA) normal.

4. El dato de atributos de la lluvia aplicada.

Los eventos pluviales utilizaron fueron en formato imágenes raster, obtenidos del sistema operativo PERSIANN (Estimación de Precipitación a partir de Información de Detección Remota usando Redes Neuronales Artificiales) desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Detección Remota (CHRS-UCI-USA) disponibles en la base de datos web satelital (Fig. 3) (Montealegre Medina y Gaspari. 2023). Se han considerado tormentas de tipo erosivo, es decir mayores a 12,7 mm/h, analizadas según la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional. Se definieron cuatro tormentas para la modelización, siendo de 40, 79, 121 y 183 mm.

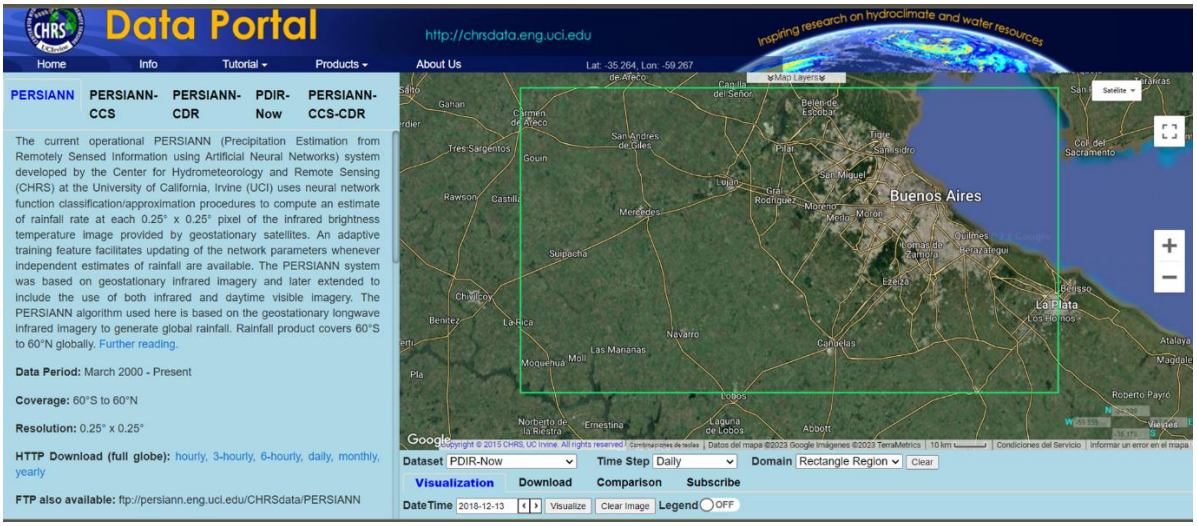


Figura 3. Portal de datos pluviales. https://chrsdata.eng.uci.edu/

RESULTADOS

La zonificación de la CARR expresa lomadas intercaladas con los planos aluviales y una planicie en la cabecera con suelos pardos, con subsuelo de loess / limo que definió el grupo hidrológico. La cobertura y uso del suelo, el 72 % es agropecuario con presencia de pastizal y 23% con herbáceas cultivadas, siendo el resto de uso urbano-forestal, indicando paisajes con susceptibilidad hídrica alta-media en zonas pertenecientes a las riberas de los ríos o cercanas a los cuerpos de agua, media en zona de amortiguación de planicies y/o actividades agropecuarias y baja en perímetros urbanos, ya que se asume que estos poseen una adecuada planificación territorial para prevenir o mitigar eventos de inundación.

El clima indica gran variabilidad pluvial anual en las 4 estaciones meteorológicas estudiadas Merlo, Luján, Mercedes y Navarro, como se muestra en la Fig. 4. Entre 1960 y la actualidad, con el análisis de los eventos pluviales, que definieron las tormentas a modelizar.

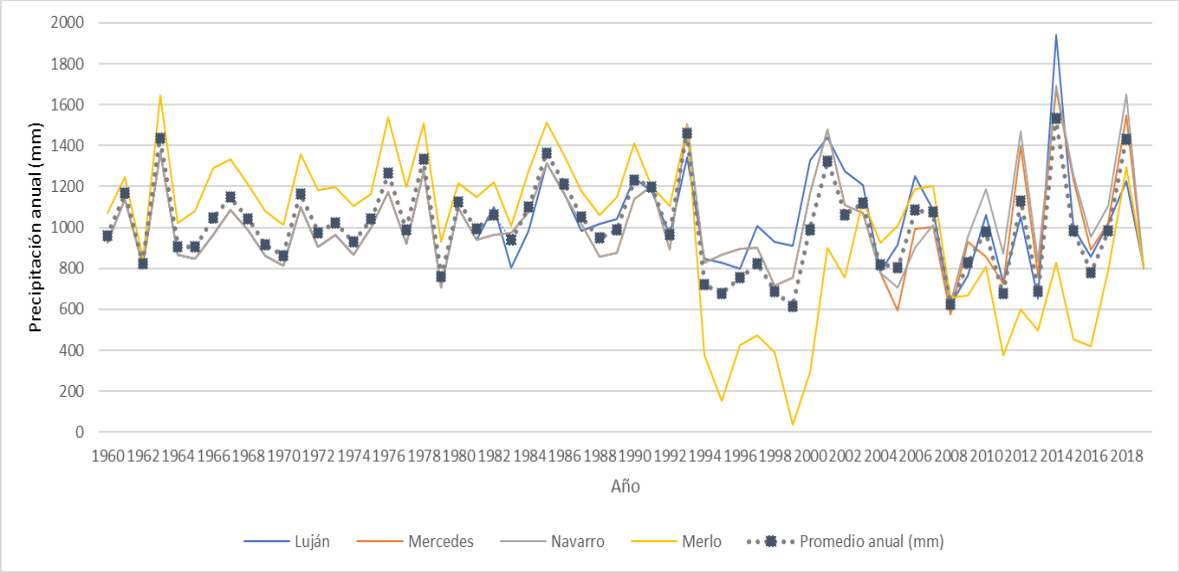


Figura 4. Precipitación promedio y anual por estación (mm/año).

El método contempla la clasificación hídrica de los suelos, reconociendo cuatro grupos hidrológicos (GH) de respuesta ante una precipitación, según su clase textural, como se muestra en la Tabla I su descripción en la CARR y cuya zonificación se presenta en la Fig. 5.

Tabla I. Textura de suelos por grupo hidrológico y superficie de ocupación en la CARR.

GH	Textura edáfica	Superficie (ha) / (%)
B	Franco-limoso; Franco; Limoso	88.046,75 / (86,8 %)
C	Franco-arcillo-arenoso; Franco-arcillo-limoso; Franco-arcilloso	3.379 / (3,3 %)
D	Arcillo-arenoso; Arcillo-limoso; Arcilloso	9.952,73 / (9,8 %)

 ISBN 978-987-1323-91-3

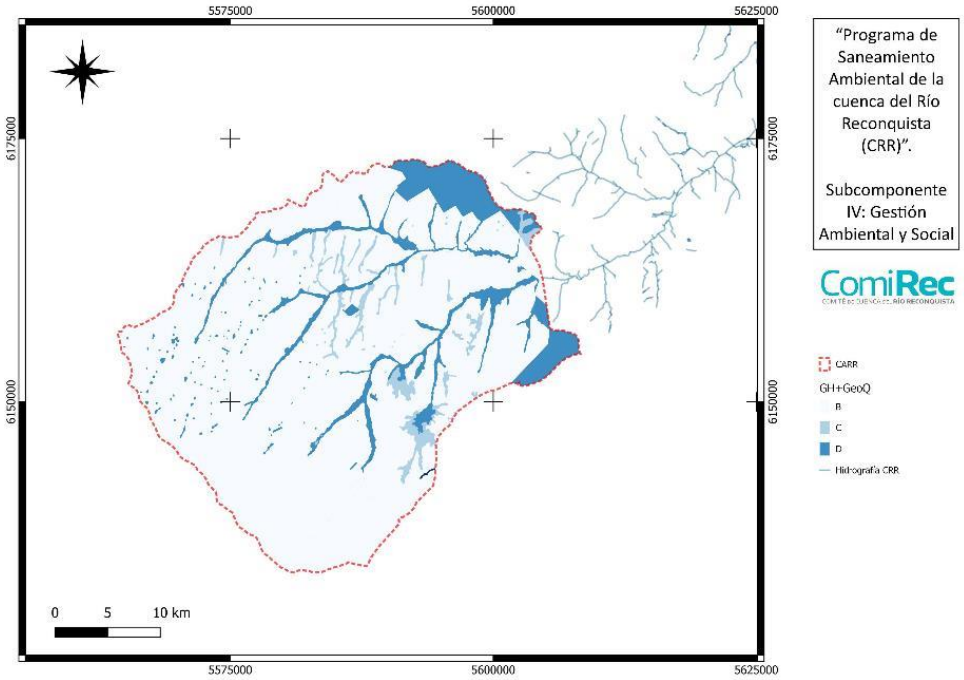


Figura 5. Zonificación de los grupos hidrológicos en la CARR.

En relación con una zonificación antecedente, detallada y actual, del uso del suelo en la CARR, se considera como base de datos la cartografía aportada por el trabajo elaborado por AECOM-Serman (2020), el cual representa el Uso del Suelo en base a clasificación de imágenes satelitales Sentinel 2 de octubre y diciembre de 2018 y enero, febrero y abril de 2019, expresando el uso rural en cuenca alta según tipo de cultivo. Esta cartografía base se procesó con SIG, para definir un mapa de la distribución de los usos del suelo, como ser los recursos forrajeros, montes y los cultivos agrícolas específicos, como ser soja de primera, maíz de primera y tardío, sorgo, y áreas con doble cultivo (soja de segunda y maíz de segunda), información corroborada por el aporte de Mondelo et al (2021).

En la Fig. 6 se visualiza la distribución de los usos agropecuarios y forestales corresponden al 91,8% de su superficie y un 4,2% está ocupado por área urbana / semiurbana. El 4% restante son cuerpos de agua temporales y permanentes, que genera modificaciones a través del tiempo hidrológico.

La zonificación del NC en la CARR para las condiciones del complejo suelo-vegetación actual definida por GeoQ, se expresa en la Fig. 7, lo cual indica el predominio del uso del suelo por forrajes en el GH B, generando un NC de 75.

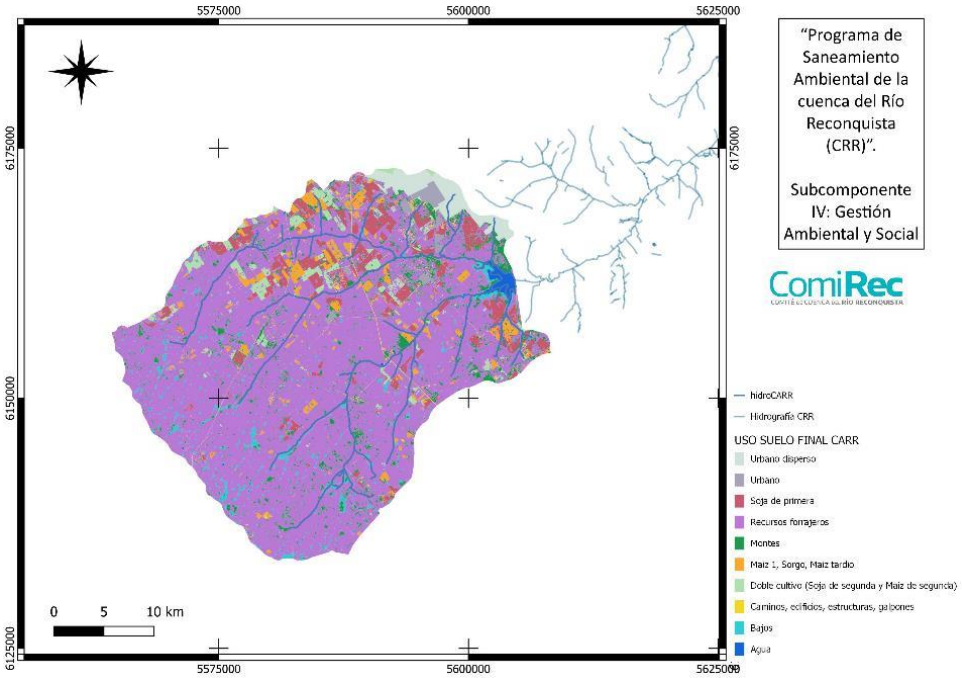


Figura 6. Distribución de usos del suelo actual. Fuente: Adaptación de *AECOM-Serman (2020).*

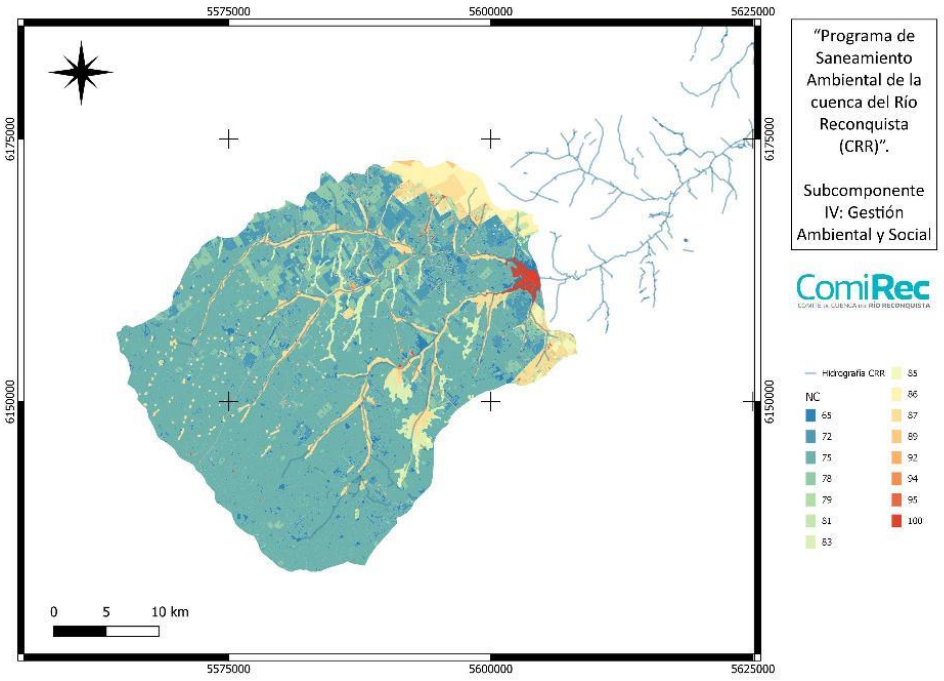


Figura 7. Distribución de NC. Fuente: Elaboración propia con GeoQ.

La zonificación y modelización de las abstracciones iniciales (Io), la escorrentía (Q) y la infiltración (F) bajo entorno SIG con GeoQ, como así también la cuantificación de cada

coeficiente (CE, CIo y CF) aplicado en la CARR, se aplicó a los cuatro eventos pluviales, mencionados con anterioridad.

El primer resultado aportado por el GeoQ es la zonificación del NC presentada anteriormente en la Figura 60, dato base para la modelización hidrológica.

Para estudiar la vulnerabilidad hídrica y definir el SHA de la dinámica hídrica superficial, se realizó la simulación geoespacial según los complejos suelo-vegetación / NC, con la finalidad de obtener la zonificación de la lámina de escorrentía, de infiltración y las abstracciones iniciales.
Los resultados comparativos para cada tormenta se presentan en la Fig. 63, que expresan la respuesta hidrológica para la tormenta modal de 40 mm, la más baja considerada como de erosionabilidad moderada, donde la CARR presenta un alto grado de retención edáfica por infiltración y por la cobertura vegetal según las abstracciones otorgadas por la vegetación, representando en los NC menores a 80, que en la CARR dominan un 84,79% de la superficie de ocupación. En este caso, el escurrimiento es bajo.
Cuando la cobertura vegetal es menos estructurante, con presencia de suelos de texturas más finas, se presentan los NC mayores, que generan menor abstracciones e infiltración, aumentando la escorrentía superficial, como es cuando NC es mayor a 80. En estos casos, se presenta, además, el uso del suelo urbano disperso a mayoritariamente urbano y la presencia de caminos, rutas, autovías, edificios, estructuras, galpones, entre los más encontrados. En la categoría NC 100 se visualiza el valor extremo de escurrimiento debido que estas superficies conforman los espejos agua permanente o de estado estacional.

A continuación, se presenta la respuesta del GeoQ con coeficientes respectivos según tormenta utilizada para la modelización hidrológica (Fig. 8, 9, 10 y 11).

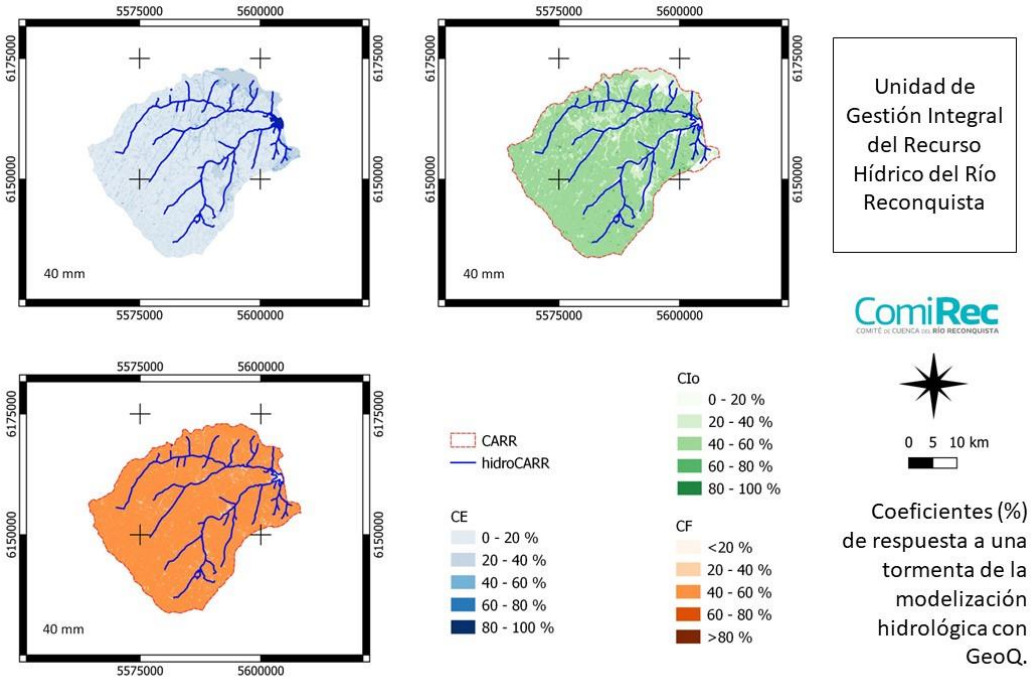


Figura 8. Distribución de los coeficientes de la modelización con GeoQ para la tormenta de 40 mm.

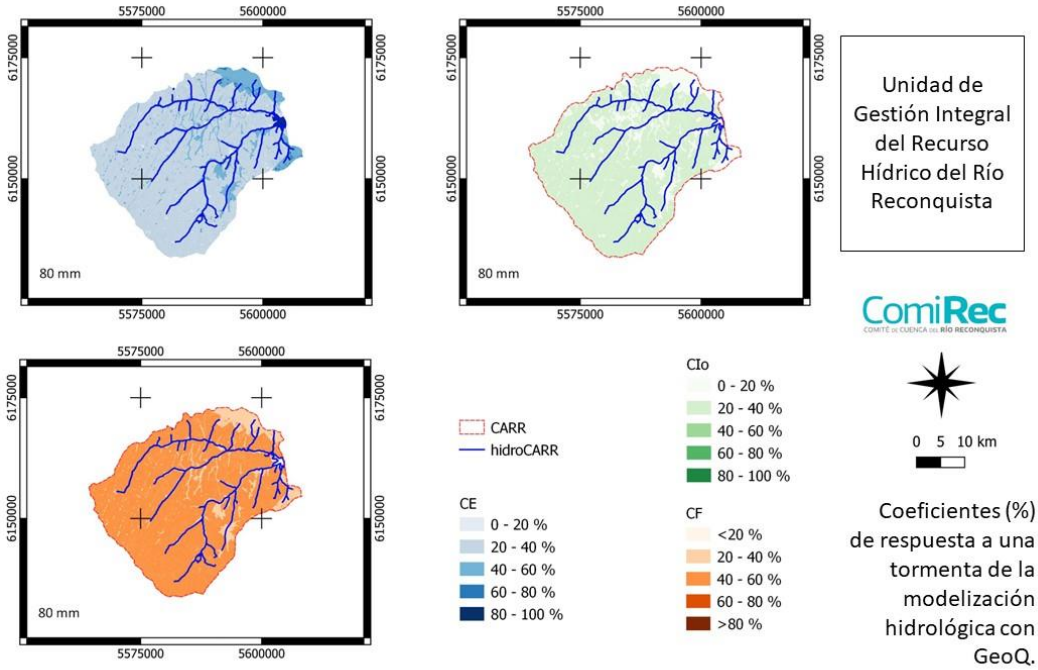


Figura 9. Distribución de los coeficientes de la modelización con GeoQ para la tormenta de 183 mm.

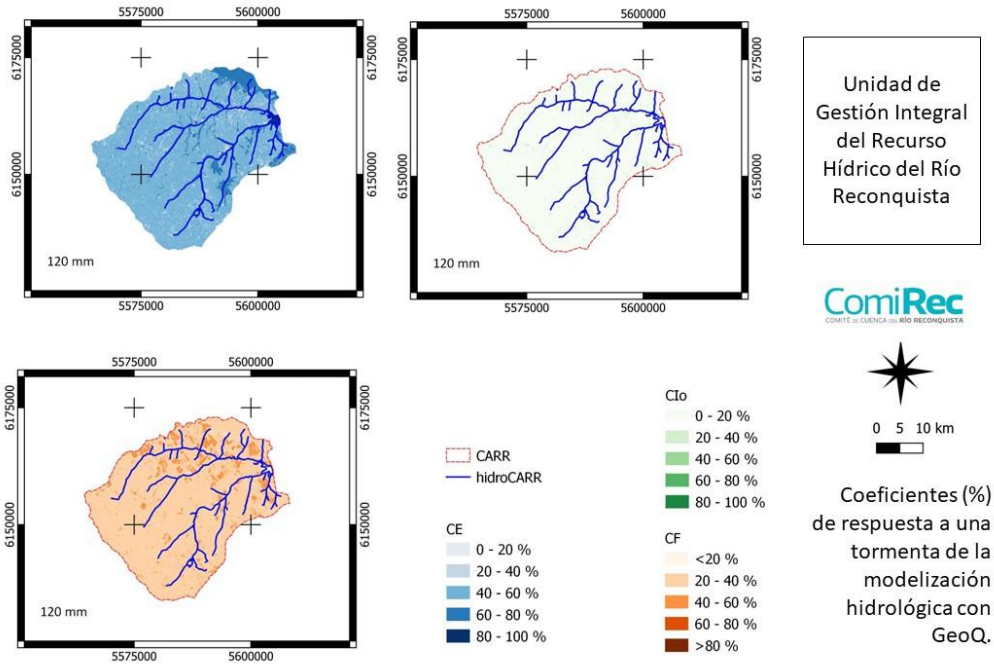


Figura 10. Distribución de los coeficientes de la modelización con GeoQ para la tormenta de 120 mm.

En la Fig. 11 se presentan los resultados de la respuesta de la modelización hidrológica con GeoQ para una tormenta extrema de 183 mm, donde se interpreta un máximo escurrimiento, debido a una saturación del suelo y de la colmatación de la cobertura vegetal. Se identifica en toda la secuencia de modelización, que el área urbana a semiurbana la infiltración es baja y que la zona rural es la que más abstracciones ofrece, la cual disminuye al aumentar el evento.

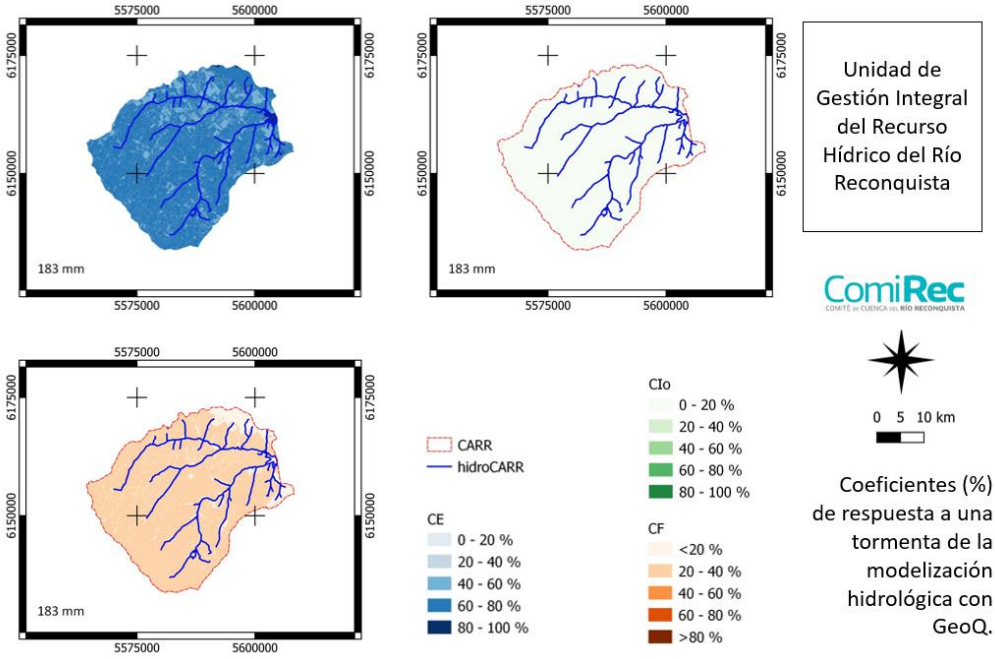


Figura 11. Distribución de los coeficientes de la modelización con GeoQ para la tormenta extrema de 183 mm.

CONCLUSIONES

La modelización geoespacial GeoQ permitió representar el coeficiente de escurrimiento/infiltración por escenario y la respuesta suelo-vegetación, reflejando también el efecto de la intensidad pluvial. Los resultados encontrados aportan al modelamiento de la escorrentía en una cuenca de llanura, siendo relevante para evaluar el comportamiento hidrológico ante diversos eventos pluviales modales, aportando a la planificación del territorio y la detección de posibles zonas que puedan sufrir de inundaciones y causar daños a la población de la región.

REFERENCIAS

AECOM-Serman. 2020. Informe de Diagnóstico Integrado. Comité de Cuenca del Río Reconquista. Provincia de Buenos Aires (Mimeo). 31 p. Disponible en www.gba.gob.ar/recursoshídricos

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays. *1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 575 pp.*

Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Montealegre Medina, F.A.. 2019. Manejo de cuencas hidrográficas. Herramientas de sistemas de información geográfica. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 121 p. La Plata. Argentina. ISBN: 978-950-34-1833-8. Versión digital. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87641

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

López Cadenas Del Llano, F. 1998. Restauración hidrológico forestal y control de la erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Edic. Mundiprensa, Madrid, España. 945 p.

Mintegui Aguirre, J. A. y López Unzú, F. 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. I parte. Servicio Central de publicaciones del Gobierno Vasco. 172p.

Mondelo V., Mazzucchelli M.G., Peroncini V., Gaspari F.J.. 2021. Análisis territorial de la cuenca alta del Rio Reconquista. Una visión integral del noreste bonaerense. E-ICES 16. 16° Encuentro Internacional Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de Cuyo. 16 al 19 de noviembre de 2021. Mendoza. Argentina. https://icesuncuyo.wixsite.com/e-ices16

Montealegre Medina, F.A. y F.J. Gaspari. 2019. Vulnerabilidad hidrológica de las cuencas del noroeste bonaerense ante eventos hidrológicos extremos. Revista electrónica Investigación Joven. Vol. 6 Núm. Especial: Encuentro de Becarios UNLP. ISSN: 2314-3991. https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/6700

Montealegre Medina, F.A. y F.J. Gaspari. 2021. GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®". Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal. UNICEN. Tandil. Vol. 9 Núm. 2 https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/1289

Montealegre Medina, F.A. y F.J. Gaspari. 2023. Monitoreo por Teledetección de la Variación del Almacenamiento de Agua Superficial en Cuencas Hidrográficas. AUGM DOMUS Revista científica de los comités de Aguas, Energía y Medioambiente. Asociación de Universidades Grupo Montevideo y la Universidad Nacional de La Plata. (10), 004. https://doi.org/10.24215/18522181e004

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA CALIZA

M. Mariel Negrelli[a], María Inés Castro[a], Eugenia Caroprese[a]

[a]*Instituto de Investigaciones Mineras, FI, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA.*

.

e-mail: marielnegrelli@gmail.com

RESUMEN

Dentro del grupo de técnicas no destructivas, los ultrasonidos pueden ser considerados como recomendables para el estudio de materiales pétreos. El empleo de esta herramienta, se centra principalmente para la detección de fisuras en las rocas; como así también, poder relacionar el tamaño del cristal (textura de la roca) con la propagación de las ondas sísmicas, y evaluar su influencia en la resistencia a la compresión. Como en San Juan, una de las principales actividades económicas es la industria calera, ya que cuenta con calizas de alta pureza química para la elaboración de la cal, se ha observado que, en la etapa de la voladura y molienda, poseen un comportamiento diferencial siendo algunas más frágiles que otras, con incidencia en la generación de finos. Es por ello que, en este trabajo de investigación, se pretende conocer el comportamiento de las ondas sísmicas, a partir de medidas de pulsos ultrasónicos sobre rocas calcáreas y su efecto sobre las discontinuidades y textura. Esto permite determinar la calidad de la caliza, en términos del contenido de micro-fisuras internas y su resistencia en base al tamaño del cristal. Para lograr dicho propósito, se realizaron diferentes tipos de ensayos (químicos, ultrasonidos, compresión simple) de probetas de rocas calizas, procedentes de diferentes áreas de la provincia de San Juan. En este trabajo se presentan los resultados preliminares de investigación, a fin de planificar la operación minera de una manera integral, que propicie optimizar la energía, disminuir la producción de finos, y mejorar la calidad del producto final.

Palabras Clave: Calizas, Ultrasonido, Textura.

INTRODUCCIÓN

San Juan es una provincia que se caracteriza por su larga trayectoria minera, especialmente por su actividad calera, dedicada a la extracción e industrialización de la piedra caliza para la elaboración de cales. La provincia cuenta con emplazamientos geológicos representados por una sucesión de rocas carbonáticas de edad Cámbrico tardía a Ordovícica, de alta pureza química. Debido a ello, en términos de calidad, las empresas caleras focalizan su estudio en cumplir con las normativas químicas. A pesar de contar con calizas de alta pureza, se han observado diferentes problemáticas en los procesos que van más allá de los aspectos químicos, y que pudiesen estar relacionados a las propiedades intrínsecas de las calizas como la mineralogía, el empaquetamiento cristalino, discontinuidades, y la porosidad. Durante el proceso de la voladura y la molienda, se han advertido que estas presentan un comportamiento diferencial con la incidencia de generación de finos, ya que hay calizas más frágiles unas con respecto a otras.

Dentro de los aspectos físicos como el contenido de discontinuidades (microfisuras), textura (tamaño del cristal), porosidad y aspectos químicos entre otros, de una manera u otra influyen en los procesos de elaboración de la cal. Y estos aspectos, propiedades intrínsecas de la piedra caliza, dependen del ambiente genético, lo que diferencian distintos tipos de calizas.

El termino discontinuidad se emplea aquí de un modo genérico para hacer referencia a todas aquellas estructuras con geometría más o menos planar, que rompen la continuidad de una roca tales como lo son las “fisuras”. El termino textural podemos definirlo como el conjunto de relaciones espaciales intergranulares y de características morfológicas (tamaño del cristal) de los componentes minerales de la roca. En este trabajo se contempla la abundancia relativa de micrita y esparita. La micrita es el cristal de carbonato de calcio cuyo tamaño es inferior a los 5µm; mientras que la esparita consiste en cristales de calcita de tamaño superior a las 5 µm. Normalmente, cuando el tamaño del cristal está entre 5 y 10 µm se denomina microesparita.

El pasaje de ondas de ultrasonido a través de la roca, presenta las siguientes características: El contenido de discontinuidades, determina tanto la velocidad de propagación de las ondas por la roca, así como la dispersión de la misma, condicionando la mayor o menor energía con la que se reciba finalmente la señal (Martinez y Martinez et al, 2006).

El incremento de la porosidad en las rocas calcáreas implica descensos tanto en la velocidad de las ondas p (Vp) como en las Vs. Dicho descenso es aproximadamente el doble de rápido en Vp que en Vs (Assefa et al, 2003).

Las superficies de discontinuidad generan una importante dispersión de la energía de la onda (atenuación espacial), así como un retraso en su velocidad de propagación. Ambos factores dan lugar a que cuantos más defectos contenga la roca en su interior, mayor dificultad encuentra la onda durante la propagación (Martinez J. y Martinez, 2008).

Por lo expuesto, el objetivo de este trabajo es entender la relación existente entre la velocidad de pulsos ultrasónicos y las características de la roca caliza analizada, teniendo en cuenta aspectos como la textura mineral y fisuramiento. Estas variables se consideran condicionarían la velocidad de la onda dentro de la roca. La técnica resulta de interés para la predicción de material fino, en los procesos de voladura y molienda.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se realizó un muestreo en tres sectores de la precordillera sanjuanina, y se consideraron aquellas con contenidos químicos superiores al 90% en CO3Ca. Las mismas fueron caracterizadas de la siguiente manera: a) mineralógica y petrográficamente; b) mecánicamente mediante ensayos de compresión simple y c) dinámicamente utilizando el método de ultrasonido. Para este último ensayo, se contó con un equipo de ultrasonido Pundit Lab., de la serie PL02-001-0097, Software Versión '2.0.5', Hardware Revisión 'B0' - Signature '09000000'.

De los bloques recolectados en el campo, se prepararon probetas cubicas, de alrededor de 72 mm por lado, y cilíndricas con una relación altura - diámetro de 2,5 a 3. Se estudió total de 9 probetas.

El estudio fue realizado de la siguiente manera:

Etapa A

Estudios químicos para determinar características composicionales. Estudios petrográficos para determinar características texturales. Estudios mecánicos para determinar la fragilidad de los distintos tipos de calizas bajo análisis.

Para los primeros estudios, que corresponde a la caracterización química de las calizas, se realizó aplicando la Norma ASTM C_25-99 y la Norma IRAM 1613. Las determinaciones gravimétricas fueron: Pérdida de humedad, (p 105°C), pérdida por calcinación (PPC), residuo insoluble en ácido clorhídrico incluida la sílice (Res, Ins) y, por último, óxidos combinados precipitables por hidróxido de amonio (R_2O_3.). También se determinó volumétricamente el contenido de CaO y MgO mediante complejometría con EDTA. En todos los casos las determinaciones se controlaron con patrones trazables al NIST, en un laboratorio que recertifica anualmente estas metodologías.

En los segundos, se procedió a la observación en cada una de las probetas, con el apoyo de la lupa binocular (marca Leica S6DStereo Microscope); con un análisis esencialmente descriptivo y cualitativo, permitiendo evaluar características generales, como la identificación y disposición de las discontinuidades (ver Fig. 1a). Posteriormente se analizaron las calizas mediante observaciones al microscopio óptico, considerando tamaños y porcentajes en contenidos de los cristales (micrita, microesparita y esparita) (ver Fig. 1b). Dichas observaciones fueron realizadas mediante el empleo del microscopio óptico de polarización, marca Leica modelo DM 2700 P. A la manera de ejemplo, se muestran las características generales de las rocas calizas bajo estudio.

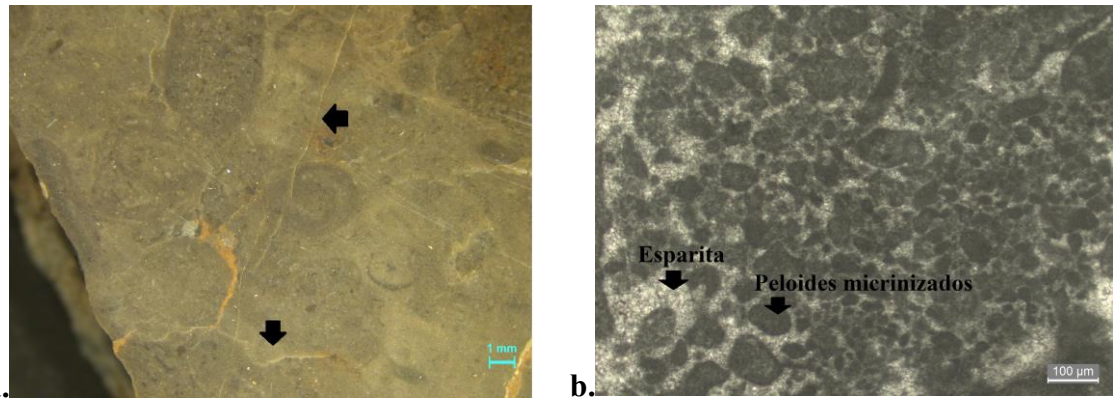


Figura 1. a. Fisuras rellenas por calcita. **b.** Contenidos de micrita y esparita.

En los terceros, se realizó el análisis de la resistencia a la compresión simple. Se utilizó una prensa modelo Controls Advantest- 9 que posee una capacidad máxima de 4000 kN y una velocidad de carga entre 0,1 a 1 MPa/s, la que se trabajó con 0,6 MPa/s. (ver Fig. 2a y 2b). Como ejemplo, se muestran fotografías de una de las probetas en el ensayo.

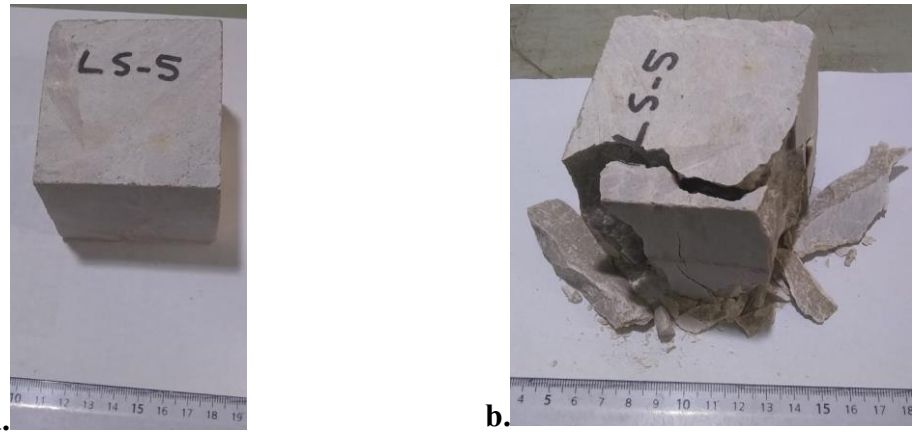


Figura 2. a. Probeta antes del ensayo. **b.** Después del ensayo.

Etapa B

En esta etapa, se realizó la medición de velocidad de propagación de onda, en cada una de las probetas. El equipo de Ultrasonido consta de una unidad generadora de pulsos, capaz de emitir señales de ondas P y S, con frecuencias entre 54 MHz hasta 250 MHz, lo que lo hace adecuado para la realización de medidas en rocas (ver Fig. 3).

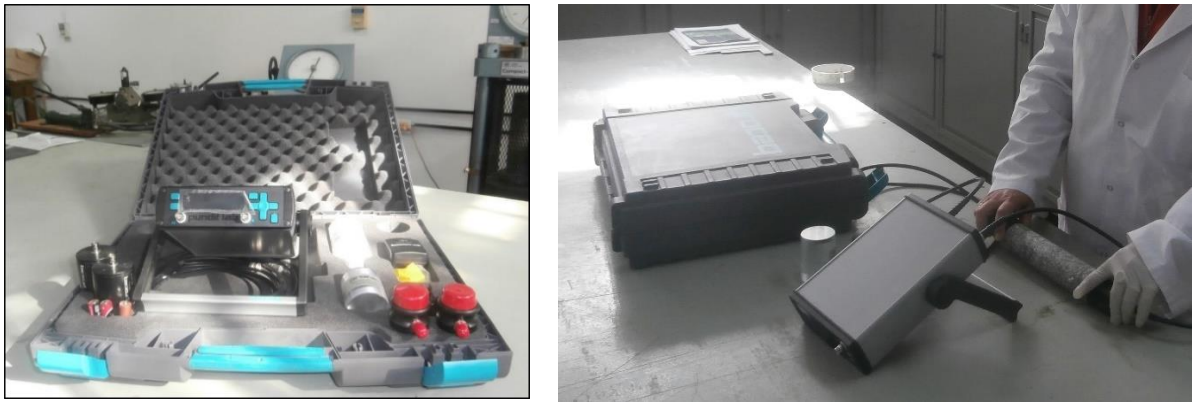


Figura 3. Equipo Ultrasonido.

La técnica empleada es por transmisión directa, es decir, se requiere de dos transductores, uno emisor y otro receptor, y se alinean correctamente a cada lado de la probeta para su perfecta transmisión. De esta manera se analizó la onda en forma discreta por medio de un programa realizado en el MATLAB, por el cual se estudió una característica muy importante como es la atenuación espacial de la onda. Las ondas ultrasónicas como cualquier pulso mecánico, se propaga con mayor velocidad por sólidos que por fluidos. Además, las superficies de las discontinuidades (fisuras) generan una importante dispersión de la energía de la onda, como así también un retraso en la velocidad de propagación. Ambos factores dan lugar a que cuantos más desperfectos contenga la roca en su interior, menor será la velocidad de propagación. Estas consideraciones se orientan a determinar cuál de las variedades de calizas presentan mayores discontinuidades, y por lo tanto mayores condiciones de base para el comportamiento frágil.

Posteriormente se realizaron ensayos de compresión simple, con el propósito de correlacionarlos con los del ultrasonido.

Los resultados de estos ensayos aportan información complementaria y de gran valor interpretativo en términos de la fragilidad de la roca. Ambas técnicas resultan oportunas y cercanas, para la correlación con el comportamiento de la roca en el proceso de voladura y molienda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se describieron cada una de las probetas obtenidas en los diferentes afloramientos calcáreos de la provincia. Previamente, las mismas fueron analizadas químicamente, y se consideraron aquellas por encima del 50% de CaO. Los resultados se adjuntan en la Tabla I.

Tabla I. Análisis químicos.

Muestra	Res. Ins.	R2O3	CaO	MgO	p105º	PPC
	%	%	%	%	%	%
LS-3	0,51	0,40	50,73	4,44	0,10	43,35
LS-6	0,78	0,47	55,14	0,09	0,08	43,32
PLA - 1	2,24	0,07	53,58	0,49	0,22	42,77
L 1	0,99	0,07	54,78	0,20	0,21	43,50
L 2	1,04	0,08	54,35	0,35	0,16	43,37
L 3	0,69	0,12	54,54	0,30	0,13	43,97
L 5	1,07	0,07	54,78	0,32	0,18	43,59
L 6	1,29	0,08	54,64	0,30	0,17	43,56
L 7	0,79	0,12	54,46	0,26	0,06	43,88

Las calizas del sector norte (LS) corresponden a calizas macizas claras con bajo porcentaje en discontinuidades; se observaron fisuras rellenas de calcita y estilolito (contactos irregulares con contenidos de óxidos y/o arcillas).

La del sector central (PLA 1), caliza compacta y oscura, no se le observaron discontinuidades, solo presenta un bajo contenido de venillas rellenas de calcita y estilolito.

Las correspondientes al sector sur (L), calizas claras, se les observo la presencia de discontinuidades delgadas y en parte rellenas por calcita y óxidos.

En la Tabla II, se adjuntan los resultados obtenidos mediante las técnicas de estudio contempladas.

Tabla II. Valores del ensayo de Ultrasonido – Tamaño de cristales – Resistencia a la compresión simple

Muestra	**Veloc. P (m/s)**	**Veloc. S (m/s)**	**Mód. de Elast. dinám. (Kg/cm^2) Ed**	**Coef. de Poisson** ν	**Aten. Espacial** α_ε	**Tamaño de cristal M: micrita ME: microesparita E: esparita**	**Com. Simp. [kg/cm2]**
LS-03	7605	3397	849817,9	0.38	13.8129	Predominio de M	575,9
LS-06	6794	3217	757710,3	0.36	13.0836	Predominio de M	433,9
PLA-1	6500	3037	637532,7	0,35	10.9521	Predominio de ME y E	356,7
L1	7091	3355	843429,6	0,36	10.8120	Predominio de M	443,3
L2	7189	3670	968823,6	0,32	13.4374	Predominio de M	471,1
L3	7027	3109	733588,1	0.38	13.7928	Predominio de ME y E	270,8
L5	6855	3093	722835,2	0,37	13.6486	Predominio de ME y E	365,5
L6	7414	3614	970287,5	0,34	12.5444	Predominio de ME y E	332,1
L7	6882	3363	833358,7	0,34	13.0481	Predominio de M	421,3

A modo de referencia en el cuadro adjunto (ver Tabla III) se presentan todas las variables determinadas mediante el equipo de ultrasonido, al igual que los valores obtenidos de los ensayos de compresión simple, junto con los valores de los residuos insolubles.

En nuestro caso hemos correlacionado la velocidad primaria, con el ensayo de compresión simple, los residuos insolubles y los aspectos texturales, haciendo una diferenciación general entre texturas finas (predominantemente micriticas) y gruesas (predominantemente microesparita y esparita).

La consideración de la velocidad primaria se hace en este estudio ya que es la que se condiciona con el grado de discontinuidades de la roca. Es la onda que vibra en forma longitudinal al sentido de propagación de la onda primaria.

Y con respecto a los residuos insolubles, se tuvieron en cuenta también en esta correlación, ya que contienen los restos de cualquier arcilla, minerales silíceos u otros materiales refractarios, que pudiesen influir en el comportamiento mecánico de la caliza.

En la Tabla III se muestra un resumen de las variables utilizadas para la interpretación de resultados.

Tabla III. Tabla Resumen

Textura	Compresión Simple [kg/cm^2]	Ultrasonido Velocidad P (m/s)	Químico Res. Ins. %	Tendencia del comportamiento
Predominio de ME y E	356,7	6500	2,24	Más frágil
	270,8	7027	0.69	
	365,5	6855	1,07	
	332,1	7414	1,29	
Predominio de M	575,9	7605	0,51	Menos frágil
	433,9	6794	0,78	
	443,3	7091	0,99	
	471,1	7189	1,04	
	421,3	6882	0,79	

ME: microesparita – E: esparita

CONCLUSIONES

La correlación de los resultados, permite identificar a aquellas calizas con texturas finas (con predominio de micrita), muestran mayores velocidades de la onda de ultrasonido, además, tienden a presentar en líneas generales menores porcentajes en residuos insolubles y requieren mayores cargas para su fracturamiento; mientras que las de textura más gruesa (con predominio de microesparita y esparita), poseen un comportamiento inverso. Por lo antedicho, las texturas más finas poseen un comportamiento menos frágil respecto de las más gruesas. Esto se deduce a partir de que las muestras más finas han necesitado una mayor carga en el ensayo de compresión simple hasta lograr su fracturamiento; y por otro lado se advierten velocidades secundarias mayores, lo que estaría indicando una menor proporción de discontinuidades en el interior de la roca. El ensayo de ultrasonidos posee la ventaja que proporciona rapidez de la respuesta, debido a que la operación es electrónica, suministra indicaciones prácticamente instantáneas de la presencia de fisuras internas. Pero como toda técnica, posee una serie de limitaciones de uso o desventajas como la localización mejor de aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido. Se recomienda la realización sobre un número estadísticamente representativo de muestras de calizas, para este tipo de ensayo, que permitan poder caracterizar la presencia de discontinuidades internas y el empaquetamiento cristalino y evaluar su comportamiento en la etapa de voladura y molienda.

REFERENCIAS

Assefa S., McCann C., Sothcott J. Velocities of compressional and shear waves in limestones, *Geophysical Prospecting*, 51: 1-13, (2003).

Martinez J. y Martinez, Benavente D., García del Cura M. La propagación de ultrasonidos en el estudio de materiales petreos: aplicación al estudio de las propiedades texto-estructurales de las rocas y de su grado de alteración. En ingeniería del terreno", p. 171-194, (2006).

Martinez J. y Martinez, "Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de las calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos)". *Tesis doctoral*. (2008).

MODELIZACIÓN NUMÉRICA Y A ESCALA LABORATORIO PARA ESTUDIAR LA FACTIBILIDAD DE DETECCIÓN DE TÚNELES HISTÓRICOS MEDIANTE EL MÉTODO GEOELÉCTRICO

Gustavo Quiroz[a], Alberto Lucuy[b], María Victoria Bongiovanni[b], Matías de la Vega[c]

[a]*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, ARGENTINA.*
[b]*Facultad de Ingeniería, LIDTUA, Universidad Austral, CONICET, Buenos Aires, ARGENTINA.*
[c]*IGAIA, Universidad de Buenos Aires, IFIBA-CONICET, Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: gust.quiroz@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se expone un estudio de factibilidad de detección de túneles históricos utilizando el método geoeléctrico con modelados numéricos, modelos de laboratorio y mediciones de campo. Se destaca la dificultad inherente en la detección de cavidades especialmente en entornos urbanos, y se explica la elección del método geoeléctrico debido a su capacidad para detectar anomalías sin interferencias electromagnéticas. El método se considera adecuado para la investigación del patrimonio cultural por su naturaleza no invasiva. Además, se describe el proceso de modelado, prospección geofísica y procesamiento de datos para la interpretación de anomalías por parte de la comunidad arqueológica.

Palabras Clave: Geoeléctrica, Modelado numérico, Túneles, Geofísica

INTRODUCCIÓN

En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires se encuentra el barrio Parque Avellaneda, con una población de alrededor de cincuenta mil habitantes y una superficie de 5.1 km^2. El Parque Avellaneda fue inaugurado el 28 de marzo de 1914, se sitúa en este barrio y alberga la antigua Casona de los Olivera, que anteriormente pertenecía a una estancia de 30 hectáreas propiedad de Domingo Olivera. Este espacio se ha convertido en un importante pulmón verde y centro comunitario. En los últimos años, se ha iniciado una fase de recuperación de su patrimonio arqueológico, lo que ha llevado a la investigación de la posible presencia de túneles bajo el parque. Uno de estos túneles, se cree, podría haber conectado la Casona de los Olivera con Villa Ambato, una antigua residencia ahora convertida en la Escuela Técnica N°8 'Paula Albarracín de Sarmiento'. La localización de túneles en entornos urbanos presenta desafíos debido a la presencia de infraestructuras como cableado y tuberías, lo que hace crucial el uso de métodos de detección no invasivos.

El área de estudio se encuentra al norte de la Casona y abarca unos 15×27 m^2, situada a unos 40 m de la entrada noroeste de la casona. Este espacio se caracteriza por su césped natural y caminos de sedimentos arcillosos, y es llano. En el año 2018, se llevaron a cabo estudios geofísicos en el parque (Bongiovanni et al., 2018) utilizando métodos como la inducción electromagnética, el georradar y geoeléctrica, los cuales revelaron la presencia de anomalías (ver Fig. 1) que sugirieron la existencia de un túnel que conecta la Casona con Villa Ambato. Estos resultados preliminares han impulsado la necesidad

de una investigación más detallada para confirmar la presencia y características de este túnel, así como para comprender su relevancia histórica y arqueológica en el contexto del barrio Parque Avellaneda.

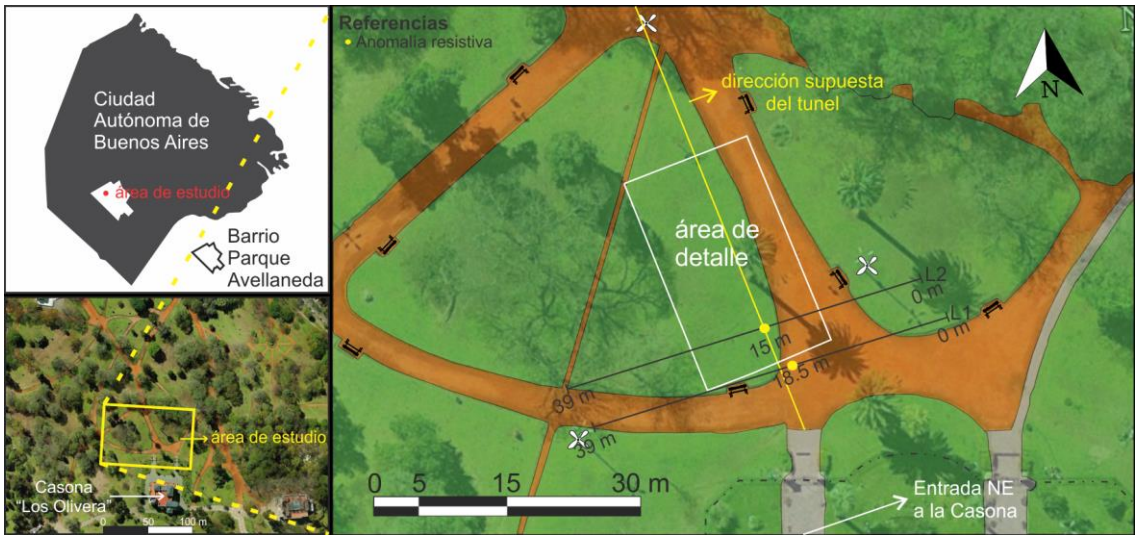


Figura 1. Zona de estudio y área de detalle. Allí se muestran dos líneas y sus respectivas anomalías encontradas en 2018 (Bongiovanni et al., 2018).

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la factibilidad de detección de túneles utilizando el método geoeléctrico en el Parque Avellaneda. Esto implica llevar a cabo prospecciones geofísicas, obtener tomografías eléctricas para identificar anomalías y crear un mapa para su interpretación arqueológica. Además, se realizarán modelados numéricos y a escala de laboratorio para determinar las configuraciones electródicas y parámetros de inversión adecuados.

METODOLOGIA

El presente trabajo se dividió en tres etapas principales: modelados numéricos, modelados a escala laboratorio y mediciones de campo. La importancia del modelado numérico radica en estudiar la factibilidad del método geoeléctrico en la detección del objeto de interés (Binley y Slater, 2022). Si el cuerpo no logra ser detectado en este primer paso, donde la complejidad del problema es menor que en la realidad, podremos descartar la utilización del método en el campo, evitando las posibles pérdidas que conlleva una prospección geofísica. Luego, la proporcionalidad de los problemas en geoeléctrica, nos permite estudiar a escala laboratorio el cuerpo de interés (Loke, 2001). De esta manera, podremos obtener información sobre las configuraciones electródicas idóneas y parámetros de inversión adecuados a utilizar en el campo, ya que estos dependerán de la naturaleza de la estructura buscada y su relación con el medio circundante (Osella, 2006).

Modelado numérico

Para realizar los modelados numéricos se utilizó el software COMSOL Multiphysics (2017) con las configuraciones electródicas dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger y Wenner-gamma. Este programa permitió resolver el problema directo de geoeléctrica,

que consiste en determinar la resistividad aparente dada una disposición específica de resistividad en el espacio y una geometría particular.

Se establecieron dos bloques: uno representaba un semiespacio infinito para satisfacer las condiciones de borde, mientras que el otro servía como dominio de la prospección geoeléctrica en el subsuelo. Se introdujo un cilindro para simular el tubo. Además, se dispuso una cuadrícula de 16x16 electrodos en la superficie del segundo bloque para las inyecciones de corriente requeridas.

La primera posición analizada consistió en colocar el cilindro a una profundidad constante de 1 cm desde la superficie hasta su parte superior. Se posicionó paralelo al eje Y, a 8 cm del eje X, como se muestra en distintas perspectivas en la Fig. 2.

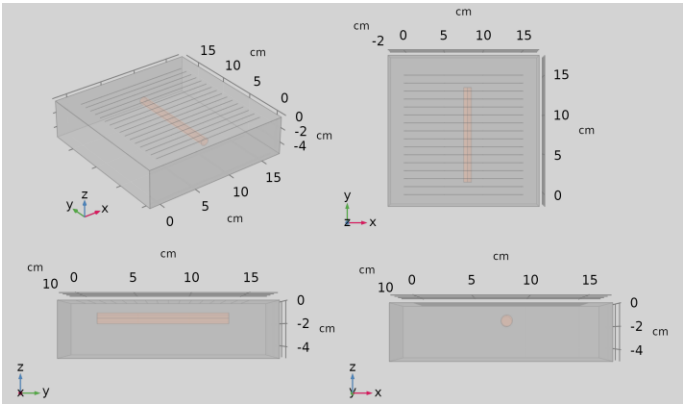


Figura 2. Distintas perspectivas del cilindro a profundidad constante y paralelo al eje Y.

Se asignó una resistividad de 10^6 Ωm al cilindro y 1 Ωm al suelo. Cabe consignar que lo que nos interesa principalmente no es detectar valores absolutos de resistividad, sino detectar distintos contrastes en dichos valores. Luego se utilizó la configuración Wenner-Schlumberger y se llevaron a cabo ambas con los mismos valores de resistividad ya mencionados. Por último, se modeló la respuesta del arreglo Wenner-gamma con aberturas de 1, 2, 3, 4 y 5 cm.

Como en el campo la orientación de la cavidad respecto a las líneas no está determinada previamente, se realizó una simulación con el cilindro dispuesto como se muestra en la Fig. 3, de modo que no es paralelo a ninguno de los ejes horizontales. Se asignó una resistividad de 10^5 Ωm al cilindro y de 10^2 Ωm al medio circundante utilizando el arreglo dipolo-dipolo.

 ISBN 978-987-1323-91-3

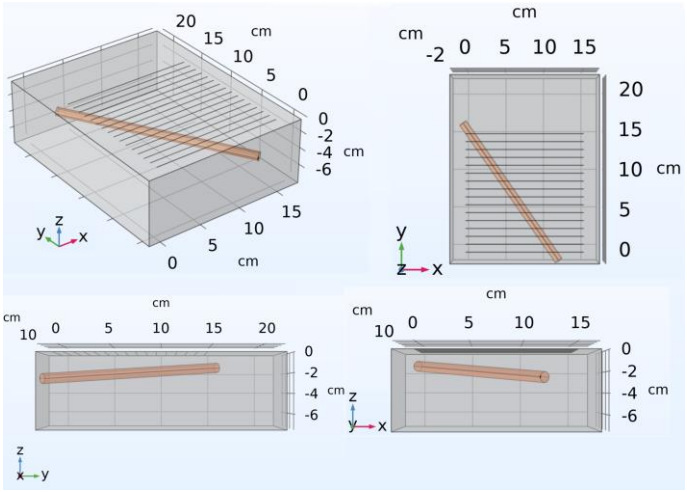


Figura 3. Posición del cilindro no paralelo con los ejes cartesianos simulado en COMSOL.

Modelado a escala laboratorio

El equipo de geoeléctrica utilizado (ver Fig. 4.b.) durante las mediciones de laboratorio y de campo fue proporcionado por el Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental (GAIA) de la UBA. Este instrumento ha sido diseñado con el fin de realizar estudios de la subsuperficie somera, especialmente para caracterizar objetivos arqueogeofísicos (de la Vega et al., 2021). Este da como salida los valores de potencial y corriente eléctrica.

Con estos datos y conociendo la posición de los electrodos se puede calcular la resistividad aparte. Esta resistividad aparente se utilizó para obtener los valores de resistividad del medio a través de los códigos de inversión de los softwares RES2DINV y RES3DINV.

En estos programas se pueden modificar los parámetros de la inversión, es por esto, que se han comparado los resultados de tres tipos de inversión (Tipo A, B y C). En la inversión tipo A, se utiliza un factor de amortiguamiento inicial de 0.15 y mínimo de 0.02, con un límite de convergencia RMS del 1%. Los datos y el modelo no están sujetos a restricciones robustas, y se emplea el método de cálculo de la matriz Jacobiana Gauss-Newton. Además, se utilizan diferencias finitas para el modelado directo, y la optimización se realiza con el método Gauss-Newton completo. Por otro lado, en la inversión tipo B, los parámetros son similares a los de la tipo A, con la excepción de que el factor de amortiguamiento inicial es de 0.30, no hay restricciones robustas para el modelo, y se utiliza el método de optimización Gauss-Newton incompleto. En la inversión tipo C, se emplean los mismos parámetros que en la tipo A, pero se introduce una restricción robusta para los datos y el modelo, con un factor de corte de 0.05 y 0.005 respectivamente.

El modelo consistió en un tubo relleno de aire sumergido en una solución salina acuosa (ver Fig. 4.a.). Dicho tubo, como es evidente, representa el túnel, mientras que el agua representa el subsuelo. Se realizaron tomografías 2D utilizando las configuraciones electródicas dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger y Wenner-gamma. Se llevaron a cabo tres diferentes disposiciones del tubo dentro de la cuba electrolítica, modificando su profundidad, posición y orientación.

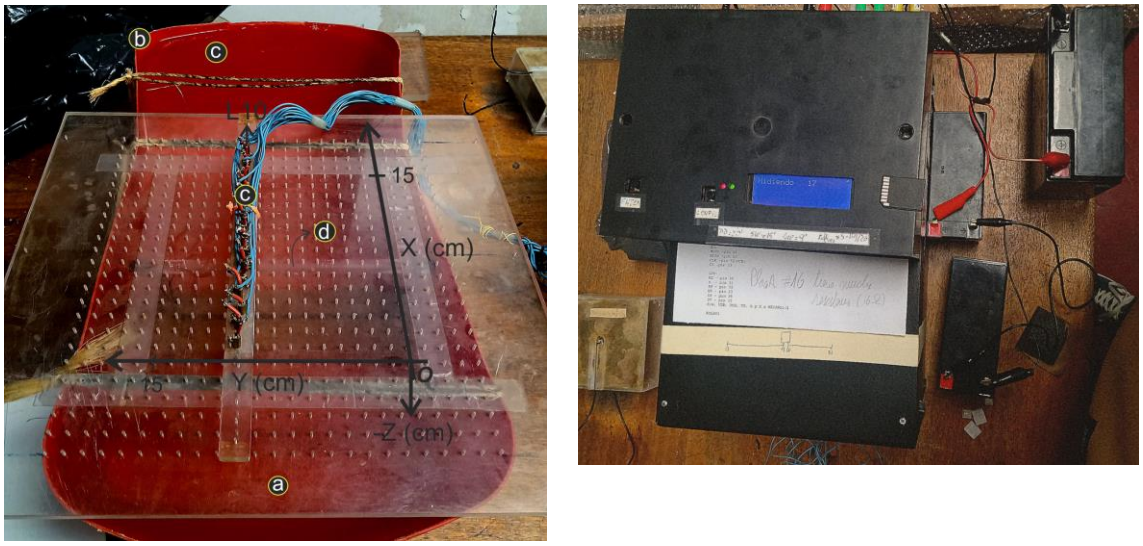


Figura 4. Fotografías tomadas en el laboratorio del GAIA. **a.** Elementos utilizados para el armado del modelo de laboratorio. a-placa de acrílico. b-recipiente plástico. c-agua con sal. d-tubo plástico con tapones de corcho. **b.** Equipo medidor facilitado por el GAIA y utilizado durante todo este trabajo.

Experiencia 1

En este modelo se optó por comprobar la respuesta que tendría el sistema al posicionar el tubo perpendicular a las líneas de medición. Se lo dispuso como se muestra en la Fig. 5, ubicado a 8.5 cm de distancia en el eje X. Se sumergieron ambos extremos del tubo a una profundidad de 1 cm de la superficie de agua.

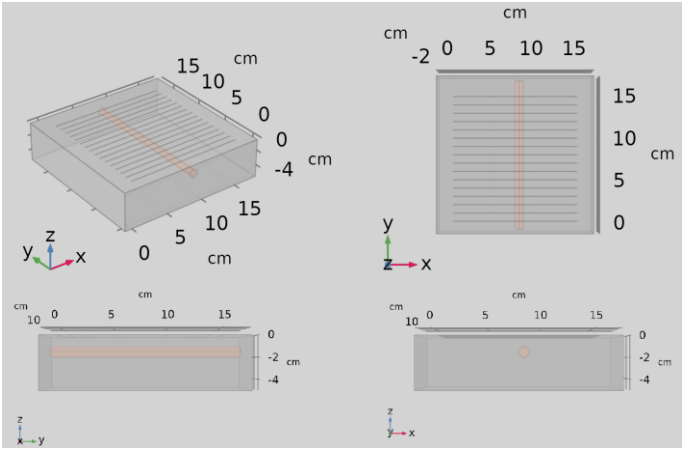


Figura 5. Posición del tubo en la Experiencia 1.

Inicialmente, se utilizó la configuración electródica dipolo-dipolo para realizar perfiles geoeléctricos, con la intención de medir las 16 líneas paralelas al eje X. Sin embargo, debido a limitaciones de tiempo, ya que cada linea de medición lleva unos 20 minutos, y a la aparición de la anomalía esperada en las mediciones iniciales, se decidió omitir algunas líneas y se optó por medir solo en las líneas L1, L2, L3, L4, L5, L7, L9, L10, L11, L13 y L15. Posteriormente, se empleó la configuración electródica Wenner-

Schlumberger, manteniendo el tubo en la misma posición que en el método anterior, y se realizaron mediciones en las líneas L1, L2, L3, L4, L6, L8, L10, L12, L14 y L16, con un tiempo de aproximadamente 15 minutos por línea de medición.

Experiencia 2

En esta experiencia, se posicionó el tubo de manera que no quedara ni paralelo al eje X ni al eje Y, con sus extremos a distinta profundidad. Para esto, la posición del primer extremo fue de 10 cm en X, mientras que 2.3 cm en el eje Y a una profundidad de 2.1 cm. El segundo extremo se ubicó en X = 6 cm, e Y = 15 cm, y Z = -1 cm, como se muestra en la Fig. 3. Para esta instancia, la medición fue realizada solo con el arreglo dipolo-dipolo y se midieron las líneas: L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13, L14 y L15.

Experiencia 3

En esta última medición, se quiso comprobar en qué medida mejora la inversión si ambos extremos del tubo se encontraban a la misma profundidad de 1 cm, pero que no se oriente de forma paralela ni al eje X ni al eje Y. Antes de realizar las mediciones, se procedió a limar las puntas de los electrodos y aplicarles un líquido que mejora la transmisión de corriente. Las líneas medidas fueron L2, L8 y L13. Las tres líneas fueron realizadas mediante el arreglo dipolo-dipolo, y el tubo se dispuso con un extremo en X = 13.5 cm e Y = 0, y el otro en X = 3.5 cm e Y = 15 cm (ver Fig. 6).

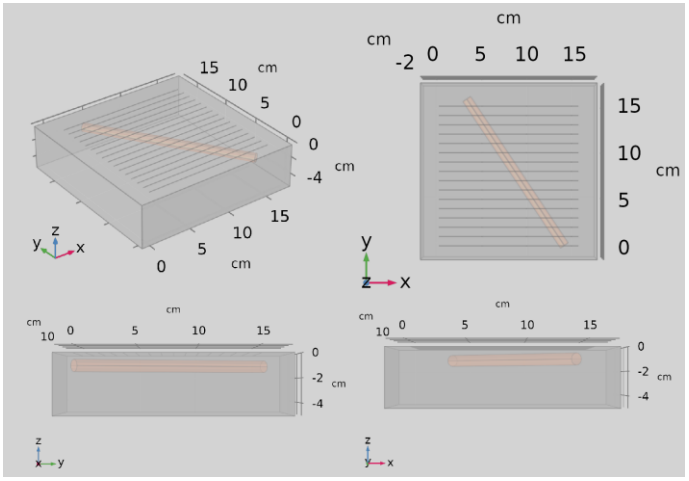


Figura 6. Posición del tubo en la *Experiencia 3*.

Prospección Parque Avellaneda

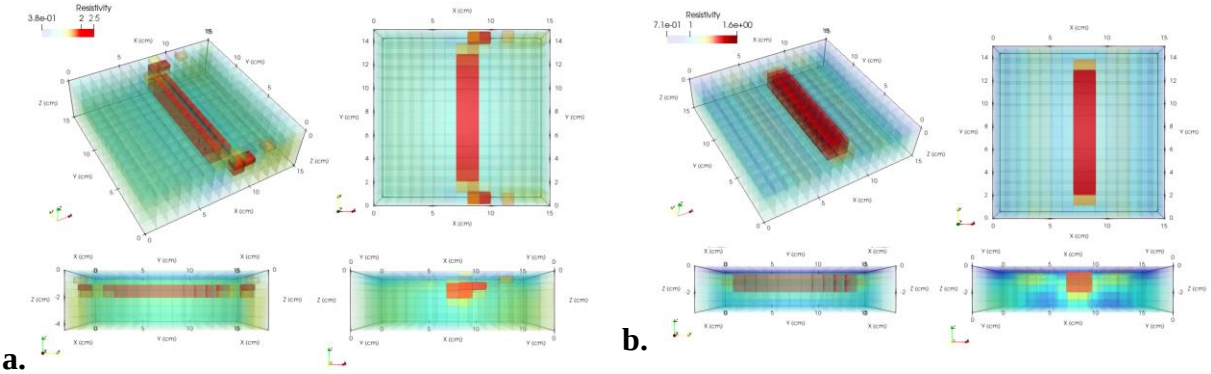
Se llevó a cabo la prospección geoeléctrica utilizando nueve líneas paralelas con orientación NE-SO y dos líneas perpendiculares (L11 y L10) con el objetivo de cubrir un área extensa manteniendo una alta resolución espacial. Las líneas estaban separadas por una distancia de 3 m entre sí. Las mediciones fueron realizadas con el arreglo dipolo-dipolo a lo largo de 15 m, con 16 electrodos espaciados equidistantemente por 1 m. El procedimiento de medición incluyó clavar los electrodos en el suelo a una profundidad de aproximadamente 3 cm y conectar el equipo a través de cables. Los

datos fueron procesados utilizando inversiones Tipo A, Tipo C y promedio, seleccionando finalmente los perfiles óptimos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado numérico

De las simulaciones realizadas con el cilindro en posición horizontal, se obtuvieron tomografías 3D con los arreglos dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger, mientras que con la configuración Wenner-gamma se obtuvieron en 2D. A partir de estas, se determinó el valor de resistividad de cada cuerpo, la posición y dimensión del cilindro.



a. **b.**

Figura 7. Tomografías 3D resultantes del modelado numérico de un cilindro a profundidad constante. **a.** dipolo-dipolo. **b.** Wenner-Schlumberger

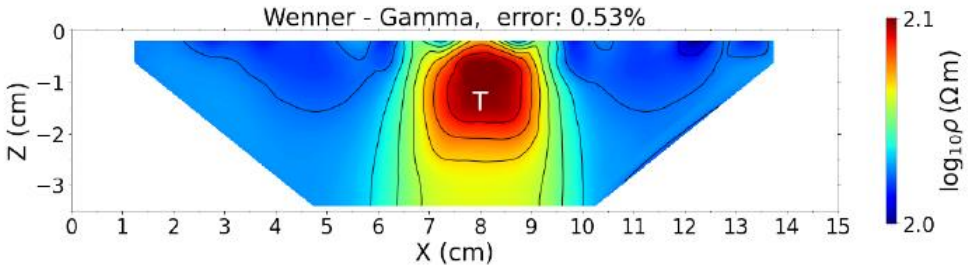


Figura 8. Tomografía eléctrica 2D resultante del modelado numérico de un cilindro a profundidad constante mediante el arreglo Wenner-gamma. La letra T indica el eje del tubo en el modelo inicial.

Respecto a la posición del cilindro no paralelo con los ejes cartesianos, en la Fig. 8 se aprecia la tomografía para esta posición, donde se puede observar, donde la región anómala se extiende coincidiendo con el modelo numérico inicial.

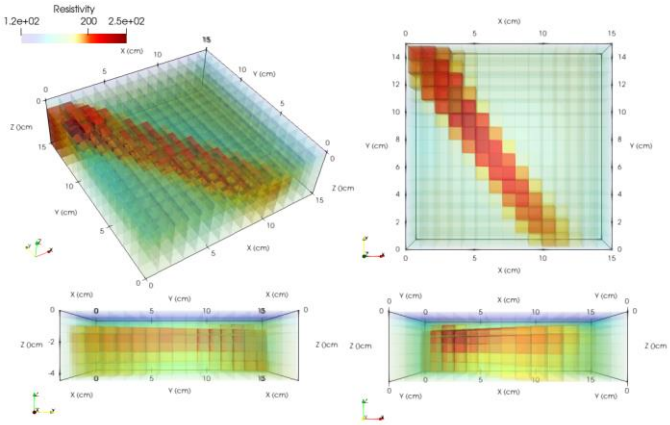


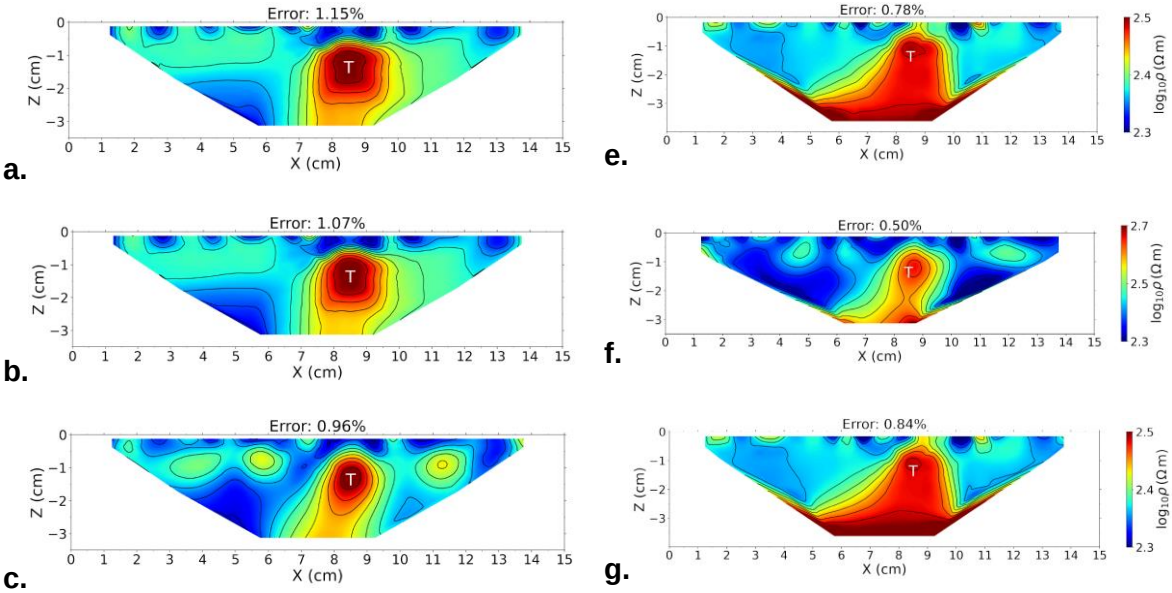
Figura 9. Tomografía eléctrica 3D resultante del segundo modelado numérico de un cilindro no paralelo con los ejes cartesianos mediante DD, error=0.29%

Modelado a escala laboratorio

Experiencia 1

Se obtuvieron las tomografías para los tres tipos de inversión y la resultante del promedio, como se puede observar en las figuras 9.a., 9.b., 9.c. y 9.d., correspondientes al arreglo dipolo-dipolo, mientras que en las figuras 9.e., 9.f., 9.g., y 9.h. se muestran las resultantes para Wenner-Schlumberger. Se observa una mejor definición de la posición del tubo para las mediciones realizadas con dipolo-dipolo.

Dipolo-dipolo **Wenner-Schlumberger**



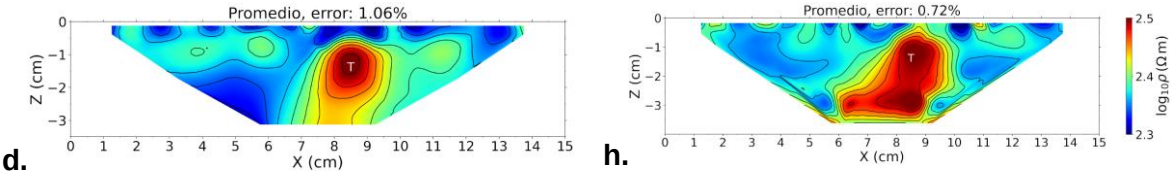


Figura 8. Tomografías eléctricas resultantes del la Experiencia 1. En la primera columna se muestran los resultados del arreglo dipolo-dipolo para los parámetros de inversión: **a.** Tipo A, **b.** Tipo B, **c.** Tipo C y **d.** promedio. En la segunda columna se observan para el arreglo Wenner-Schlumberger: **e.** Tipo A, **f.** Tipo B, **g.** Tipo C y **h.** promedio. La letra T indica el eje del tubo en el modelo inicial.

Experiencia 2

Siguiendo el análisis planteado en la experiencia anterior, se puede ver en la Fig. 11 los perfiles de las líneas L1, L6, L7, L8 y L12, resultantes del promedio. Se observa en todas las líneas valores de resistividad muy altos en la superficie, que parecerían indicar un mal contacto de los electrodos.

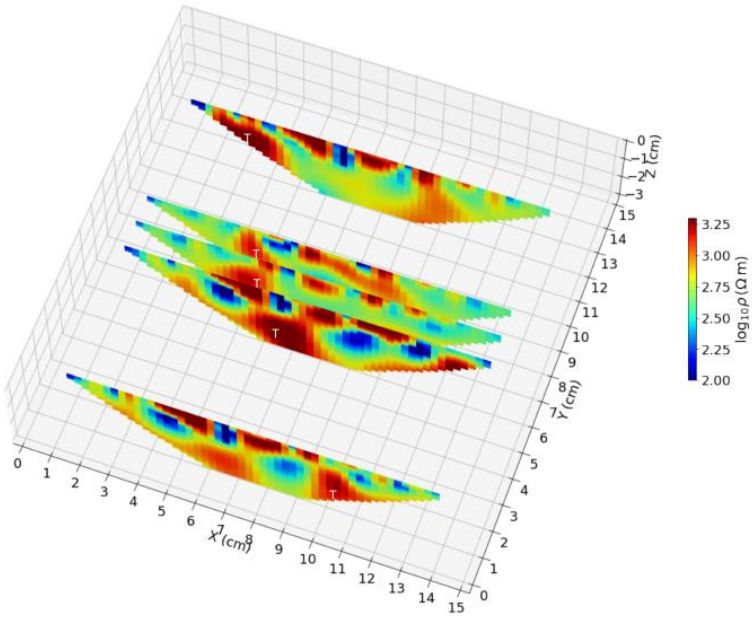


Figura 11. Pseudosecciones 2D de las líneas L1, L6, L7, L8 y L12 mediante el arreglo dipolo-dipolo para la Experiencia 3. Se usó el promedio.

Experiencia 3

Se pudieron obtener las tres líneas en formato de pseudosección como se muestra en la Fig. 12 Donde en cada una de las líneas se observan anomalías resistividad coincidentes con la posición del tubo en las mediciones.

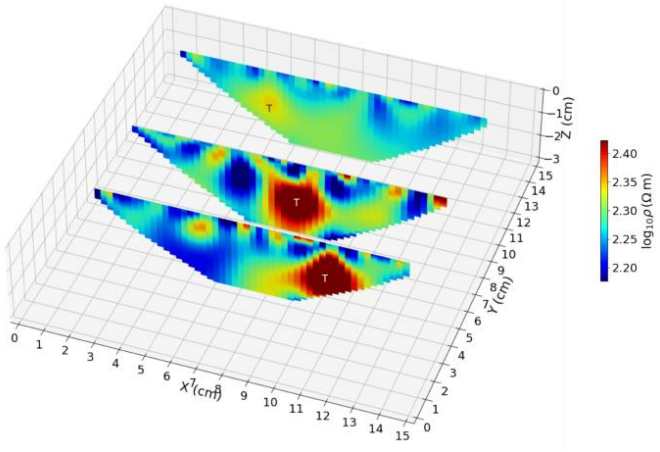


Figura 12. Líneas 4, 8 y 13 mediante el arreglo D-D. Experiencia 3. Inversión tipo B.

Prospección Parque Avellaneda

Las mediciones realizadas en el campo proporcionaron perfiles de resistividad para cada una de las líneas (ver Fig. 13). Esto permitió realizar la interpretación y la elaboración de un mapa de anomalías de la zona de detalle.

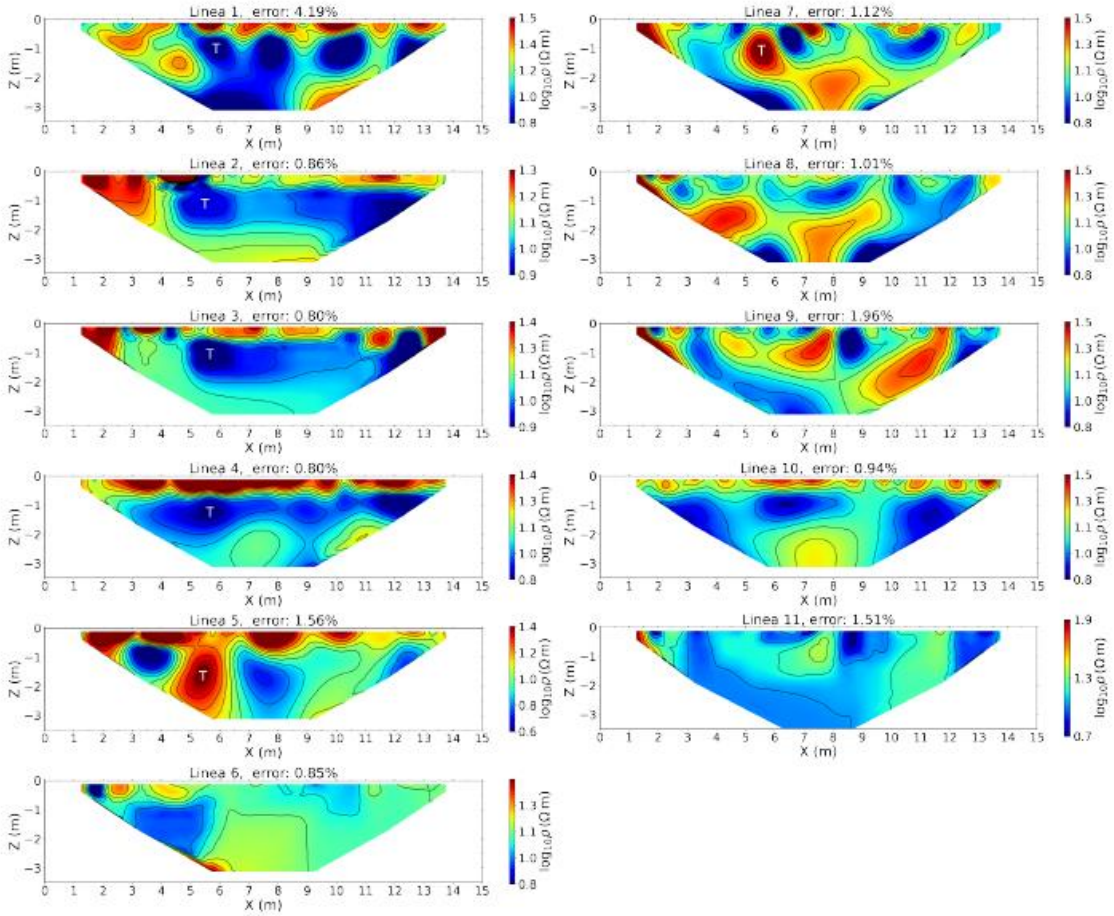


Figura 13: Tomografías eléctrica 2D resultante de todas las líneas medidas en la prospección

geoeléctrica del Parque Avellaneda mediante dipolo-dipolo. La letra T indica las anomalías compatibles con el túnel.

Habiendo interpretado y reconocido las diferentes anomalías presentes en cada una de las tomografías, se ha elaborado un mapa (ver Fig. 6.7) de anomalías que podrían coincidir con el túnel. Además, se muestra la relación entre las anomalías detectadas en el estudio de 2018 y la posición de las líneas de prospección del presente trabajo.

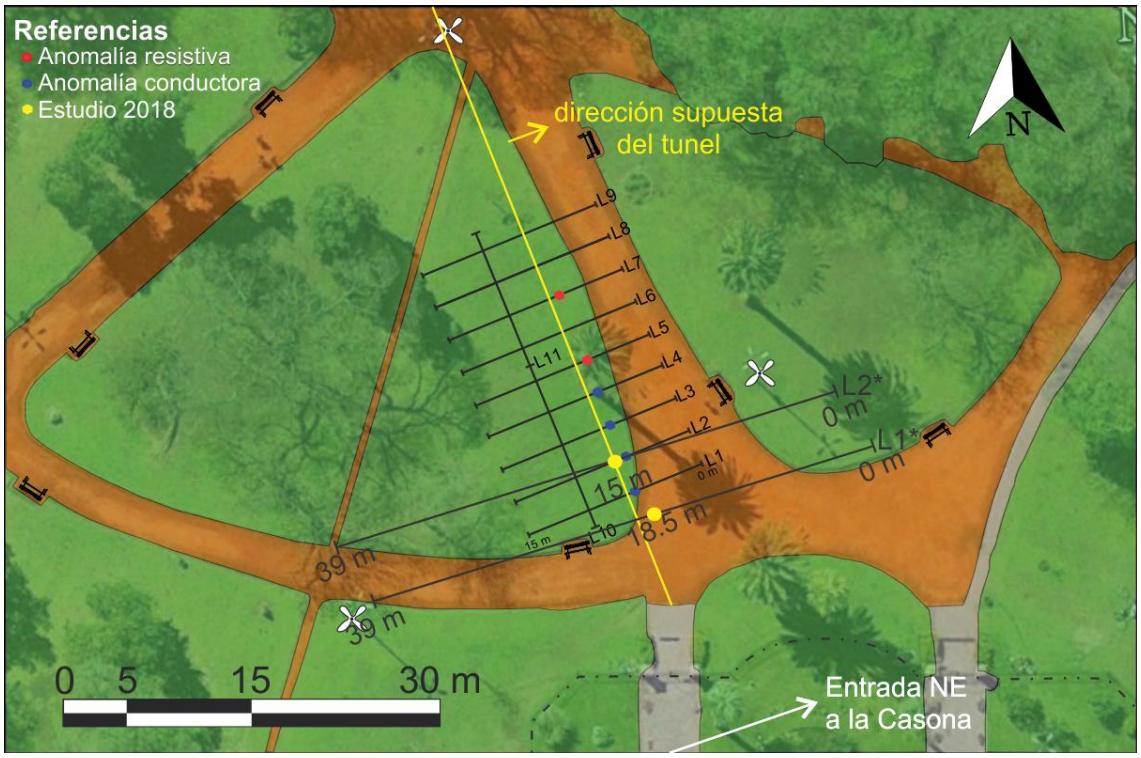


Figura 13. Zona de estudio y área de detalle donde se muestran las líneas realizadas durante este trabajo y las anomalías interpretadas que pueden coincidir con el túnel. También se encuentra la correlación con las líneas del estudio de 2018.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de factibilidad del método geoeléctrico en la detección de cavidades, mediante modelados numéricos y a escala laboratorio. Se emplearon las configuraciones electródicas dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger y Wenner-gamma. Además, se analizaron diversos tipos de parámetros de inversión y disposiciones del tubo respecto a las líneas medidas.

De este análisis, se encontró que las tomografías realizadas con el arreglo dipolo-dipolo tienen una mayor resolución para este tipo de estructura en comparación con los otros dos. Con respecto a los parámetros de inversión, las Tipo C dieron sistemáticamente anomalías más inconsistentes, mientras que las Tipo A y B arrojan mejores resultados, notándose en B que las anomalías se observan más circulares. Por otro lado, el promedio puede ser una buena opción en algunos casos para reducir el efecto de la unicidad de las soluciones. Respecto a la disposición del tubo, se observaron anomalías mejor definidas en aquellas líneas perpendiculares al cilindro o tubo. Por lo tanto, estos

hechos nos han permitido llevar a cabo una prospección geoeléctrica más eficiente en el Parque.

Finalmente, se realizó la prospección en el Parque, habiendo tenido en cuenta todas las consideraciones mencionadas anteriormente. Luego se seleccionaron las tomografías e interpretaron las anomalías. Estas anomalías presentaron una alineación que coincide con la dirección esperada del túnel, además de presentar las dimensiones típicas de un túnel de escape. La correlación de estas nuevas tomografías con las del trabajo anterior nos lleva a concluir que es plausible la presencia del túnel del Parque Avellaneda en esta zona, siendo este trabajo un inicio para los arqueólogos a fin de elaborar un plan de trabajo en la zona de estudio.

No haber podido obtener tomografías 3D para el tubo no perpendicular a las líneas demuestra una alta complejidad del método en estos casos. Por lo tanto, se propone realizar prospecciones 2D en principio, ya que las 3D son muy demandantes en tiempo y no ofrecen mayores ventajas a menos que estén en la dirección perpendicular, lo cual es muy improbable en la realidad.

REFERENCIAS

Binley, A., and Slater, L. Resistivity and Induced Polarization: Theory and Applications in Near-Surface Earth. Cambridge University Press (2022)

Bongiovanni, M. V., Grünhut, V., Martinelli, H. P., de la Vega, M., & Bonomo, N. Geoelectrical and EMI Studies at an Urban Site in Buenos Aires, Argentina, for Localizing an Old Tunnel. 24º European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (2018).

COMSOL Multiphysics v. 5.3. (2017) Stockholm, Sweden.

de la Vega, M., Bongiovanni, M. V., & Grünhut, V. Design of a Low-Cost Electrical Resistivity Meter for Near Surface Surveys. Earth and Space Science, 8, e2020EA001575 (2021).

Loke, M. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys (2001).

Osella, A., & Lanata, J. Arqueogeofísica. Una Metodología Interdisciplinaria para Explorar el Pasado (Vol. 1). Fundación de Historia Natural Félix de Azara y Universidad Maimónides (2006).

IMPLICANCIAS DE LA LITOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DEL RÍO FITZ ROY Y SU IMPORTANCIA EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO GEOLÓGICO EN EL CHALTÉN

Daniela Schmidt[a,b], Diego Winocur[ab] y Pierre Pitte[c]

[a]*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, ARGENTINA.*
[b]*Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (UBA-CONICET), Buenos Aires, ARGENTINA.*
[c]*Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET), Mendoza, ARGENTINA.*

e-mail: danielainesschmidt@gmail.com

RESUMEN

A lo largo del valle del río Fitz Roy, PNLG en los Andes Patagónicos Australes, se observan gran cantidad de procesos de remoción en masa consecuencia de la continua pérdida de las condiciones de englazamiento del paisaje. A partir del análisis de campo y la interpretación de imágenes satelitales, se reconocieron movimientos en masa a diferentes escalas, exhibiendo distintos grados de actividad, edades relativas y tanto factores condicionantes como desencadenantes. En la ladera norte de la Lomas del Pliegue Tumbado, se identifica un megadeslizamiento de unos 115 millones de m3, relíctico, de probable edad Pleistocena-Holocena desarrollado en las pelitas de la Fm. Río Mayer. Entre los procesos que involucran menor volumen, activos y con un desarrollo reciente, se identificaron deslizamientos, flujos de detritos y caídas de rocas afectando el material morénico inconsolidado que tapiza las laderas a lo largo del valle. Puntualmente, en la ladera norte del cerro Solo, se reconoce un deslizamiento activo que moviliza material inconsolidado y que, a partir del año 2007, aceleró su desplazamiento ladera bajo, concomitantemente con el incremento del retroceso del glaciar Torre. Del anterior análisis se desprende que el control litológico juega un papel primordial en el desarrollo de estos procesos en las diferentes unidades geológicas. Tanto la composición de los depósitos inconsolidados como su grado de fracturación, discontinuidades o deformación interna constituyen los factores más relevantes en el marco del retroceso glaciario. La compresión del origen, desarrollo y evolución de estos movimientos en la caracterización geomorfológica del paisaje, reviste gran importancia para la evaluación de los riesgos geológicos existentes.

Palabras clave: Factores Condicionantes, Megadeslizamiento, El Chaltén

INTRODUCCIÓN

La localidad de El Chaltén (49º 19' S, 72º 53' O) se encuentra ubicada a orillas del río Fitz Roy, inmediatamente en la confluencia de sus aguas con las del río De Las Vueltas, en la provincia de Santa Cruz, Argentina (ver Fig. 1). El río tiene su origen en el lago proglaciar Torre, situado en la vertiente oriental de los Andes Patagónicos Australes, dentro de los límites del Parque Nacional Los Glaciares (PNLG). A medida que fluye hacia al este, recorre el paisaje labrado por los procesos glaciarios imperantes en el pasado, siendo los actuales modeladores del paisaje los procesos gravitacionales. El retiro y adelgazamiento

del glaciar Torre (Masiokas et al. 2015, Schmidt et al. 2023), ha tornado las laderas de los cerros Solo y Techado Negro inestables y susceptibles a movimientos de remoción en masa. A lo largo de la Cordillera de los Andes, se han documentado gran número de megadeslizamientos que abarcan volúmenes de material en el orden de 10^8 – 10^{13} m^3(Korup et al. 2007). Estos fenómenos gravitacionales constituyen un rasgo geomorfológico recurrente y de gran importancia en la región. La tasa de deglaciación (Cossart et al. 2008, Crosta et al. 2013), las características litológicas y estructurales (Pánek et al. 2018, Schönfeldt et al. 2020), o bien, la presencia de depósitos inconsolidados (Pánek et al. 2020), constituyen algunos de los factores condicionantes para el desarrollo de los movimientos gravitacionales. Entre los factores disparadores, se pueden mencionar la actividad tectónica o bien, las condiciones climáticas extremas como los mecanismos desencadenantes más frecuentes (Ballantyne et al. 2002, McColl 2012).

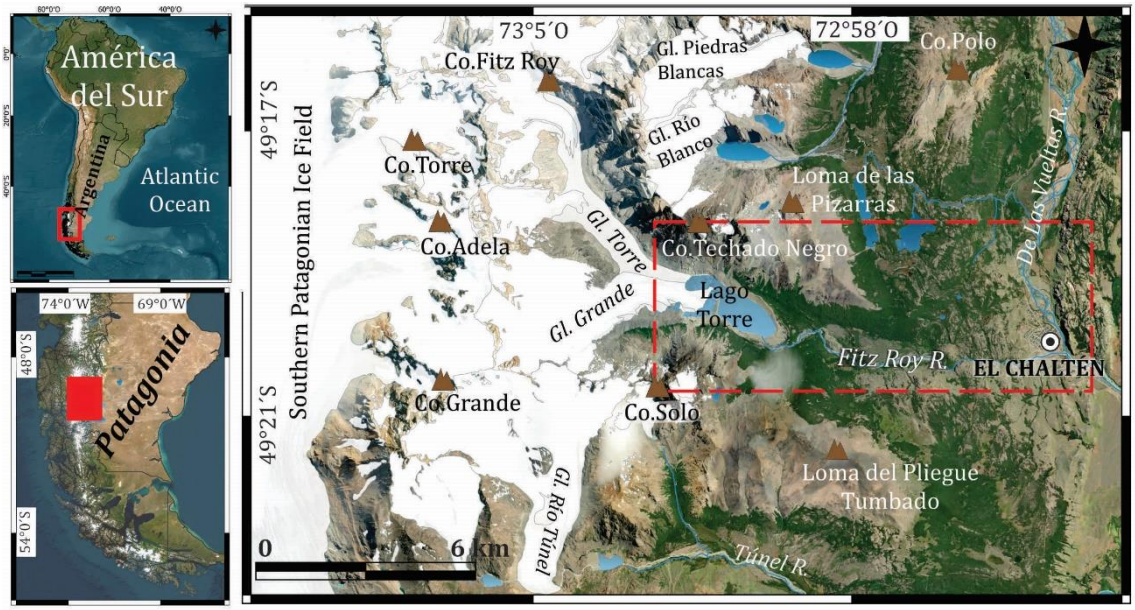


Figura 1. Ubicación del sector de estudio (recuadro rojo).

El presente estudio se centra en la caracterización, clasificación y la distribución espacial de los movimientos de remoción en masa presentes en la cuenca del río Fitz Roy. Asimismo, se analizan los factores condicionantes que podrían influir en la distribución de estos movimientos, su evolución en el tiempo y aquellos factores que podrían actuar como disparadores. La comprensión integral de estos procesos en la zona reviste gran importancia, dado que un movimiento súbito de material en las proximidades del lago Torre podría desencadenar una ola con el potencial de provocar la ruptura de la morena frontal que endica el lago y originar una crecida abrupta en el río Fitz Roy. Como consecuencia, la inundación impactaría aguas abajo, generando daños en las cercanías del PNLG y la localidad de El Chaltén.

METODOLOGÍA

Inicialmente, la metodología aplicada en este estudio se centró en el análisis y caracterización de las condiciones prevalecientes en el valle del río Fitz Roy. Dada la escasez de trabajos orientados al estudio de las geoformas presentes a lo largo del valle, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la geomorfología y morfología del paisaje.

Durante este trabajo se identificaron y describieron las diferentes geoformas presentes en el valle, hasta ahora no documentadas, distinguiendo minuciosamente aquellas generadas por procesos de remoción en masa, de las de origen glaciario. La clasificación de las geoformas asociadas a los movimientos de remoción se llevó a cabo siguiendo la propuesta de Cruden y Varnes (1996) modificada por Hungr et al. (2014). Además, se consideraron otros factores como el grado de actividad, volumen de material implicado, litologías involucradas y estructuras presentes. Además, se identificaron y evaluaron los posibles disparadores de estos movimientos recopilando información climática y de la actividad sísmica en la zona. El análisis integral de toda la información permitió interpretar la génesis de los movimientos y estimar su edad en relación al retroceso del glaciar Torre. Los resultados finales permitieron efectuar una evaluación preliminar del riesgo geológico a lo largo del valle del río Fitz Roy y la localidad de El Chaltén.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Marco geomorfológico

La cuenca del río Fitz Roy se presenta como un paisaje compuesto, donde el relieve se encuentra conformado por un sector cordillerano occidental con una orientación aproximadamente meridiana y un sector extra-andino oriental con pendientes suaves. La topografía experimenta una gradual disminución desde el Campo de Hielo en el sector cordillerano hacia la planicie del río De Las Vuelta, limitada al este por el cordón De los Cóndores. La configuración topográfica del sector se encuentra estrechamente controlada por la dureza de las litologías expuestas, así como por la influencia de procesos erosivos glaciarios y fluviales y los procesos de remoción en masa. De igual manera, los procesos de meteorización física y química ejercen un rol significativo en el modelado del paisaje en esta zona (ver Fig. 2). En este trabajo se hizo especial énfasis en la descripción de los procesos de remoción en masa, ya que constituyen los procesos con mayor implicancia en la evaluación del riesgo geológico en la zona.

A lo largo de los Andes Patagónicos, deslizamientos, caídas de rocas y flujos de detritos constituyen los principales procesos de remoción en masa que modelan las pendientes. En el área de estudio, estos procesos afectan varias litologías desde las rocas cristalinas del Complejo El Quemado o el Complejo Plutónico Fitz Roy, las secuencias finas de la Formación Río Mayer hasta los depósitos inconsolidados morénicos que recubren las laderas de los valles.

Procesos de remoción en masa inactivos

En la vertiente norte de la Loma del Pliegue Tumbado, se han detectado dos deslizamientos que se consideran depósitos relícticos debido a su condición de inactividad (UNESCO *Working Partyon World Landslide Inventory* WP/WLI 1993; Schmidt et al. 2023). Dado que este sector se encuentra cubierto por una densa vegetación, los parámetros de la masa deslizada se determinaron mediante el análisis del modelo de elevación digital ASF ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución. Se estima que el movimiento total abarca un área de ~3,2 km^2 y un volumen de 115 millones de m^3, clasificándose como un megadeslizamiento (*megalandslide* según Korup et al. 2007). Su morfología superficial se caracteriza por una textura irregular de montículos, con elevaciones y depresiones (*hummocky*), conformada por detrito y bloques de las sedimentitas finas pertenecientes a la Formación Río Mayer. En la parte superior de la Loma del Pliegue Tumbado se identifican dos cicatrices de arranque con una morfología

semicircular, afectando los afloramientos de la misma formación (ver Fig. 3). Se infiere que el megadeslizamiento se desarrolló como un movimiento de tipo complejo, caracterizado por al menos dos deslizamientos que ocurrieron de manera simultánea o bien, asincrónica, seguidos por flujos de detritos posteriores que removilizaron el material.

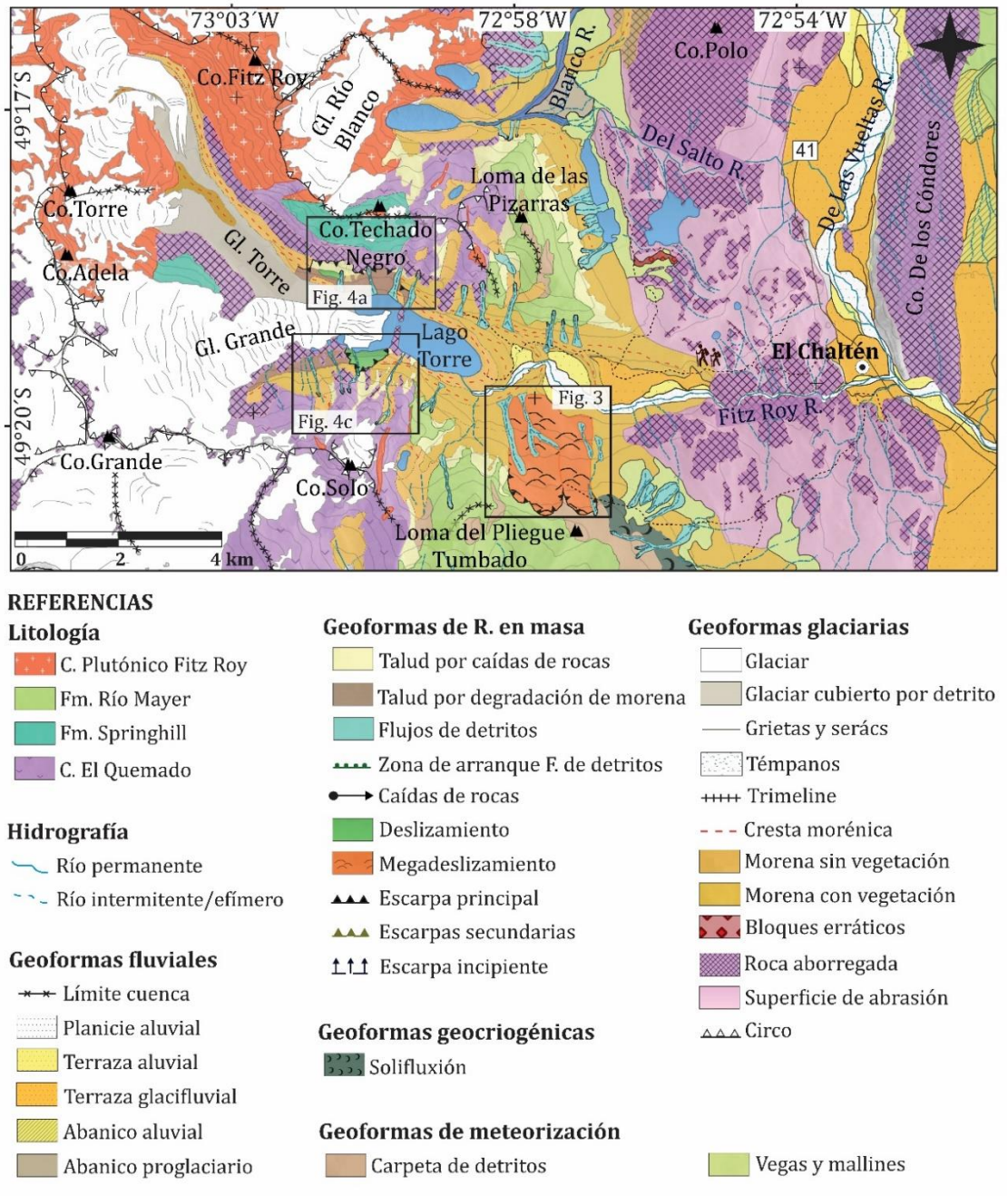


Figura 2. Mapa geomorfológico de escala 1:65000 de la cuenca del río Fitz Roy (mapa base noviembre de 2022). Se indican en los recuadros los sectores mapeados con mayor detalle en la Fig. 3 y Fig. 4 (a y b).

En estos flujos posteriores, es posible distinguir un canal principal y sus albardones laterales completamente tapizados por bosques, indicando que los procesos se encuentran

inactivos. Actualmente, los canales de estos flujos son utilizados por avalanchas de nieve y/o erosionados por flujos de detritos y soligelinivales, alimentados tanto por derretimiento de nieve como por abundantes precipitaciones. La ubicación temporal de este evento se deduce de la relación espacial entre el depósito resultante y la evolución glacial del área. Al analizar las distintas paleoposiciones que ocupó el glaciar Torre a lo largo del valle, se han considerado las posiciones propuestas por Reynhout et al. (2019). En líneas generales, estos autores proponen un esquema que abarca varios períodos de avances glaciales en la zona, identificando el más antiguo como M0, correspondiente con el Último Máximo Glacial (UMG). Al observar la disposición del depósito, situado posterior al nivel morénico M1, se puede limitar su edad a un intervalo posterior a los 13500 ± 500 años (ver Fig. 3). La relación del megadeslizamiento con el nivel morénico M2, de 9700 ± 400 años, resulta más compleja de determinar. A grandes rasgos, no se reconocen evidencias de avance glaciar sobre el megadeslizamiento que permitan acotar la edad.

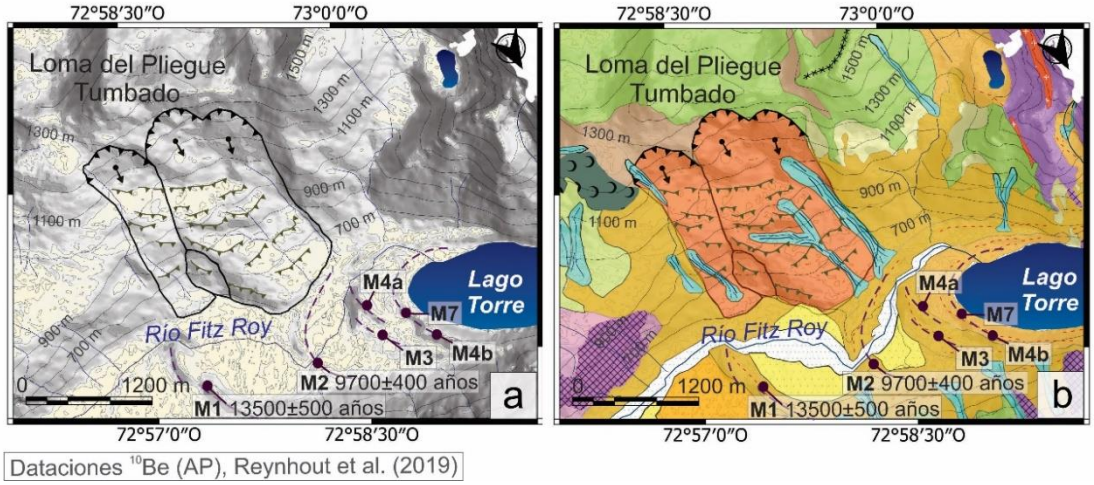


Figura 3. a) Modelo de elevación digital Alos Palsar donde se señala el megadeslizamiento relíctico y su relación con los niveles morénicos. b) Mapa geomorfológico detallado de la ladera norte de la Loma del Pliegue Tumbado. Se observan flujos de detritos posteriores al movimiento. Ver Referencias en Fig. 2.

Procesos de remoción en masa activos

En el presente estudio se han identificado numerosos depósitos generados por flujos de detritos a diferentes escalas. Estos procesos afectan variadas litologías, siendo evidentes zonas de arranque tanto en rocas cristalinas como en las riolitas y volcanitas del Complejo El Quemado, así como en las secuencias finas de la Formación Río Mayer o incluso en los depósitos morénicos que tapizan el valle (Schmidt et al. 2023). Los flujos de detritos se desplazan ladera abajo confinados en canales preexistentes desarrollados por flujos anteriores o por ellos mismos, hasta alcanzar una zona de menor pendiente donde depositan el material transportado.

La geoforma de remoción en masa con mayor superficie en el sector está representada por los depósitos de talud. Se han identificado dos clases de taludes en función de su origen y el tipo de material involucrado. En primer lugar, se encuentran los taludes alimentados principalmente por procesos de caídas de rocas, cuya composición depende exclusivamente de los afloramientos circundantes. En segundo lugar, se destacan aquellos

desarrollados sobre los depósitos morénicos inconsolidados que tapizan las laderas de los cerros Solo y Techado Negro (ver Fig. 2 y 4).

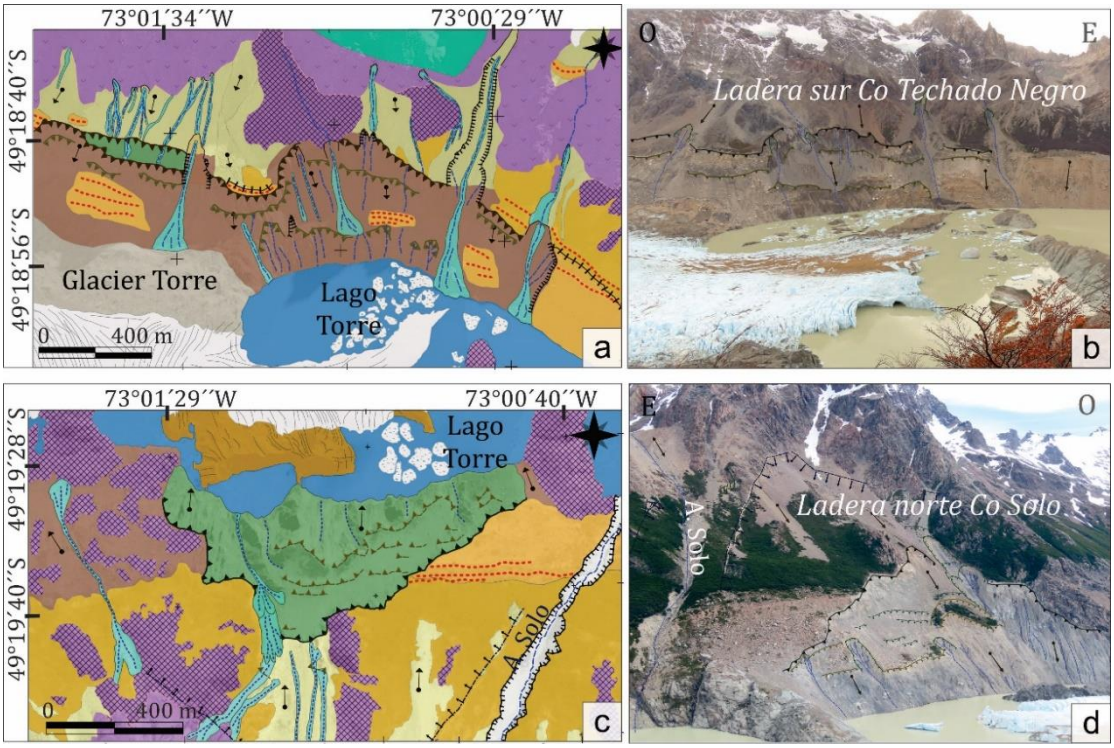


Figura 4. a) Mapa geomorfológico de la ladera sur del cerro Techado Negro y vista hacia el mismo sector (b), donde se destacan diferentes zonas de arranque de flujos de detritos y caídas de rocas en el material morénico inconsolidado. c) Mapa geomorfológico de la ladera norte del cerro Solo y vista hacia dicha ladera (d), donde se indican diferentes zonas de arranque que afectan tanto el material morénico como al bosque patagónico. Referencias en Fig. 2.

Los depósitos de caídas de rocas, indicados como "Talud por caída de rocas de afloramientos" (ver Fig. 2 y 4), están vinculados a laderas escarpadas, con pendientes pronunciadas y próximos a afloramientos tanto del Complejo El Quemado como a pelitas pertenecientes a la Formación Río Mayer. Dada su naturaleza, las caídas de rocas representan eventos altamente peligrosos, caracterizados por su súbita ocurrencia y extrema rapidez (Cruden y Varnes 1996). En el área de estudio, se han registrado bloques caídos de grandes dimensiones que suponen un riesgo para los turistas y pobladores. Estos depósitos se identifican tanto en la ladera sur del cerro Techado Negro como en la ladera norte del cerro Solo, cercanos a senderos turísticos, a lo largo de la ruta provincial 41 y en el margen occidental del cordón De los Cóndores, un área frecuentada por practicantes de escalada en roca.

Los taludes resultantes de la removilización de las morenas ubicadas a ambos márgenes del glaciar Torre, designados como "Talud por degradación de morena", están constituidos por abanicos coluviales, flujos de detritos, flujos soligelinivales y caídas de rocas (ver Fig. 3). Estos taludes han sido identificados tanto en la ladera sur del cerro Techado Negro como en la norte del cerro Solo. En el amplio talud ubicado en la ladera del cerro Techado Negro (ver Fig. 4a y b), se observa una extensa zona de arranque, con numerosos flujos provenientes de sectores con marcado e incisivo carcavamiento, que provocan derrumbes y asentamientos laterales que intensifican la erosión aguas arriba. La

zona de arranque presenta una escarpa principal de unos 1520 metros de longitud, que afecta exclusivamente el material morénico inconsolidado que recubre toda la ladera. En el extremo oriental, la escarpa se afecta al bosque andino patagónico de *Nothofagus*.

En la ladera norte del cerro Solo se identifica un deslizamiento complejo (Hutchinson 1988, UNESCO WP/WLI 1993). Este muestra una naturaleza multiepisódica, donde el desplazamiento gradual de la masa se da en diferentes bloques acompañado simultáneamente por el desarrollo de flujos de detritos y caídas de rocas (Schmidt et al. 2024). Se estima que el movimiento involucra entre ~8 (Winocur et al. 2015) y 13 millones de m^3 (Balbi et al. 2019), abarcando depósitos morénicos, de taludes por caída de rocas, flujos de detritos y soligelinivales y áreas boscosas (ver Fig. 4c y d). De acuerdo a las observaciones llevadas a cabo, el deslizamiento presenta una zona de arranque conformada por una escarpa principal, numerosas escarpas secundarias y múltiples grietas de tracción que constituyen posibles superficies de ruptura (ver Fig. 5). La zona de arranque coincide con la línea de escarpa principal, adoptando una geometría semicircular en forma de herradura con una longitud máxima de ~1060 metros. Hacia la cabecera del depósito, se identifica la traza de una escarpa incipiente, de ~1200 metros de longitud, que involucra todo el material inconsolidado que recubre la ladera, abarcando tanto los depósitos morénicos como los depósitos de talud, de flujos de detritos y soligelinivales. Desde esta extensa cicatriz de arranque se alimenta con material detrítico y bloques a toda la geoforma por medio de los flujos mencionados.



Figura 5. a) Material morénico removilizado sobre la ladera norte del cerro Solo. El depósito morénico se conforma por material no consolidado, heterogéneo, polimíctico y de granulometría variada. También se pueden observar raíces expuestas a lo largo de la escarpa. b-c-d) Grietas de tracción desarrolladas sobre la misma ladera que pueden actuar como posibles superficies de ruptura.

Factores condicionantes y desencadenantes

La ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa en la región se encuentra directamente condicionada por diversos factores como la litología, la estructura, la inclinación y orientación de las laderas, así como la herencia geomorfológica del paisaje. Además, el grado de actividad de estos procesos se halla estrechamente vinculado a la presencia y dinámica del proceso glaciario, que actuó y continúa ejerciendo influencia en el paisaje actual.

Los procesos de glaciación y deglaciación han modificado el paisaje, siendo la fase de deglaciación la imperante desde el UMG. Desde este período, grandes cantidades de depósitos morénicos que recubren las pendientes del valle han quedado expuestas. La ausencia de soporte de hielo glaciar ha vuelto inestable estas laderas, tornando a los depósitos que las cubren susceptibles a movimientos de remoción en masa. La transición del paisaje desde condiciones glaciales a condiciones paraglaciales en la cuenca del río Fitz Roy, dio lugar al desarrollo de una serie de movimientos asincrónicos. La significativa pérdida de hielo debido al retroceso del glaciar Torre, ha provocado y continúa provocando la desestabilización del paisaje montañoso. Durante la fase final del UMG, el Tardiglaciar y el Neoglaciar, el glaciar Torre ha experimentado sucesivas fluctuaciones entre avances y retrocesos. Son precisamente estos depósitos los que se encuentran actualmente sometidos a intensos procesos inestabilidad y remoción en masa.

El megadeslizamiento identificado en la ladera norte de la Lomas del Pliegue Tumbado coincide con un rasgo litológico-estructural específico. En este sector, las pelitas de la Formación Río Mayer se encuentran en contacto tectónico con las riolitas del Complejo El Quemado. Al analizar las relaciones temporales entre el megadeslizamiento y los diferentes niveles morénicos (ver Fig. 3a y b), se infiere que el movimiento tuvo lugar posteriormente a los 13500 ± 500 años, sugiriendo una ocurrencia post UMG. Las características litológicas y estructurales, en conjunto con posibles condiciones climáticas de mayor humedad, podrían haber contribuido a la inestabilidad de la ladera, predisponiéndola al movimiento. A modo de hipótesis, dado el considerable volumen de la masa deslizada, no se descarta la posibilidad de que un evento sísmico con suficiente energía haya actuado como desencadenante, desestabilizando la ladera y generando el posterior colapso de la pendiente.

En relación a los procesos de remoción en masa que afectan los depósitos morénicos que recubren las laderas de los cerros Solo y Techado Negro, se interpreta que factores climáticos, tales como períodos de abundantes precipitaciones, derretimiento de nieve y hielo, combinados con otros procesos geomorfológicos como la erosión superficial por escorrentía y la degradación en la base de las laderas, constituyen los principales desencadenantes de dichos eventos. En general, se observa que estos movimientos se desarrollan de manera gradual, en bloques y por pulsos, conjuntamente con la degradación progresiva del paisaje. Además, se identifica una estrecha relación entre los procesos climáticos y geomorfológicos y la formación de nuevas cicatrices y grietas de tracción, así como el desplazamiento en bloques de la masa. Como se mencionó en el párrafo anterior, no se descarta la posibilidad de una removilización súbita disparada por actividad sísmica somera.

DISCUSIÓN

Ciertos eventos como movimientos sísmicos o la presencia de agua por precipitaciones intensas o el rápido derretimiento de hielo y nieve, pueden actuar como disparadores de los procesos de remoción en masa. Puntualmente en el sector de estudio, los factores desencadenantes podrían provocar un desplazamiento repentino del material morénico inconsolidado que recubre las laderas, arrastrando el material hacia el lago Torre.

Como se señaló previamente, el deslizamiento desarrollado en la ladera norte del cerro Solo presenta una escarpa principal y una incipiente, cada una involucrando diferentes volúmenes de material. Un acertado entendimiento de los mecanismos y la cuantificación del volumen que podría movilizarse, resulta crucial ya que el volumen de material deslizado constituye el punto de partida para proponer escenarios tanto de máxima como de mínima en la evaluación del riesgo. En este caso particular, el ingreso súbito de un determinado volumen de material deslizado en el lago Torre, resultaría en distintos aumentos en el nivel del lago (GLOF por sus siglas en inglés *Glacial Lake Outburst Flood*) y en la generación de oleaje con diferentes alturas, potencialmente capaz de desestabilizar la morena frontal que contiene el lago. Como consecuencia, se provocaría un desagote abrupto de caudal en el río Fitz Roy, dando lugar a crecidas aguas abajo que podrían poner en riesgo a los turistas que visitan el PNLG, como así también a los habitantes de la localidad de El Chaltén y su infraestructura. La caracterización detallada del paisaje, la comprensión de su dinámica y evolución temporal, así como el análisis de los factores condicionantes y los mecanismos desencadenantes que afectan al material presente, constituyen pasos fundamentales para una adecuada evaluación del peligro por GLOF y así cuantificar la magnitud del evento y posteriormente, evaluar su potencial destructivo.

CONCLUSIONES

Se identificaron y describieron los diversos procesos de remoción en masa presentes en el valle del río Fitz Roy, estableciendo su relación con el retroceso del glaciar Torre. Dos grandes categorías de remoción en masa se identificaron, diferenciándose por sus factores condicionantes y desencadenantes, grados de actividad y edad relativa en relación con la actividad glaciaria.

En primer lugar, se identificaron movimientos de grandes volúmenes de material colapsado, de naturaleza relíctica y condicionados por la litología y estructura. Estos eventos, de probable edad Pleistocena-Holocena, podrían haber sido desencadenados por factores climáticos, aunque no se descarta la ocurrencia de un evento sísmico. Un ejemplo destacado lo constituye el megadeslizamiento en la ladera norte de la Loma del Pliegue Tumbado, que involucra aproximadamente 115 millones de m^3 y está condicionado por factores litológico-estructurales. Dado el gran volumen del depósito y considerando el contexto tectónico y estructural del sitio, se postula la posibilidad que un evento sísmico, desarrollado durante el Pleistoceno-Holoceno, haya actuado como probable desencadenante de este fenómeno.

En segundo lugar, aquellos movimientos de remoción en masa de menor volumen, activos y con un desarrollo más reciente que involucran el material inconsolidado que tapiza las laderas, se encontrarían condicionados tanto por el paulatino retroceso del glaciar como eventos climáticos. Ejemplos notables de estos movimientos se encuentran en la ladera sur del cerro Techado Negro como en la norte del cerro Solo. Particularmente, el

movimiento asociado a la ladera del cerro Solo destacar por su mayor volumen de material y actividad, acelerando su desplazamiento ladera abajo desde el año 2007, coincidiendo con la aceleración del retroceso del glaciar Torre.

La estrecha conexión entre el retroceso glaciar y la actividad de los procesos gravitacionales, como resultado de la relajación de las laderas, confirman el control climático como factor desencadenante primordial en el desarrollo e inicio de los movimientos actuales. Este aspecto es de suma importancia, ya que un movimiento repentino del material hacia el lago Torre, provocaría un aumento de su nivel y oleaje, desestabilizando la morena frontal que lo contiene y generando su rotura parcial. Esto, a su vez, podría provocar un incremento súbito del caudal del río Fitz Roy aguas abajo, poniendo en riesgo a los habitantes y turistas que visitan el Parque Nacional y la localidad de El Chaltén.

REFERENCIAS

Balbi, A.B., J.M. Bedmar, J.F. Kaufman, J.A. Oliva y D.C. Villegas. Estudio de peligrosidad geológica de la localidad de El Chaltén y de procesos de remoción en masa de la ladera norte del cerro Solo. Santa Cruz, Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Peligrosidad Geológica N° 19: 83 p., Buenos Aires (2019).

Ballantyne, C.K. Paraglacial geomorphology. Quaternary Science Reviews 21: 1935-2017 (2002).

Cossart, E., Braucher, R., Fort, M., Bourlès, D.L. y Carcaillet, J. Slope instability in relation to glacial debuttressing in alpine areas (Upper Durance catchment, southeastern France): Evidence from field data and 10Be cosmic ray exposure ages. Geomorphology 95 (1-2): 3-26 (2008).

Crosta, G., Frattini, P. y Agliardi, F. Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. Tectonophysics 605: 13–33 (2013).

Cruden, D.M. y Varnes, D.J. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report 247 (1996).

Hutchinson, J.N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Fifth international symposium on landslides 1: 3-35, Lausanne (1988).

Masiokas, M. H., Delgado, S., Pitte, P., Berthier, E., Villalba, R., Skvarca, P., et al. Inventory and recent changes of small glaciers on the northeast margin of the Southern Patagonia Icefield, Argentina. Journal of Glaciology, 61(227): 511-523 (2015).

McColl, S.T. Paraglacial rock–slope stability. Geomorphology 153-154: 1-16 (2012).

Pánek, T., Korup, O., Lenart, J., Hradecký, J. y Březný, M. Giant landslides in the foreland of the Patagonian Ice Sheet. Quaternary Science Reviews 194: 39-54 (2018).

Pánek, T., Schönfeldt, E., Winocur, D., Březný, M., Šilhán, K., Chalupa, V. y Korup, O. Moraines and marls: Giant landslides of the Lago Pueyrredón valley in Patagonia, Argentina. Quaternary Science Reviews 248: 106598 (2020).

Schmidt, D., Winocur, D., Pitte P., y Amigo, J. Condicionantes geológicos en la ocurrencia y evolución de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Fitz Roy, provincial de Santa Cruz. Revista de la Asociación Geológica Argentina 80, 4 (2023).

Schönfeldt, E., Pánek, T., Winocur, D., Šilhán, K. y Korup, O. Postglacial Patagonian mass movement: From rotational slides and spreads to earthflows. Geomorphology 367: 107316 (2020).

Winocur, D., Goyanes, G., y Viera, G. Movimiento de remoción en masa activo y su riesgo geológico asociado en la ciudad de El Chaltén, provincia de Santa Cruz. Congreso Geológico Chileno: 136-139, La Serena, Chile (2015).

DINÁMICA DEL GLACIAR TORRE Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO, PNLG, SANTA CRUZ

Daniela Schmidt[a,b], Diego Winocur[ab] y Pierre Pitte[c]

[a]*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas, ARGENTINA.*
[b]*Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (UBA-CONICET), Buenos Aires, ARGENTINA.*
[c]*Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET), Mendoza, ARGENTINA.*

e-mail: danielainesschmidt@gmail.com

RESUMEN

El retiro continuo del glaciar Torre se encuentra en el marco de un retroceso generalizado de los glaciares pertenecientes al Campo de Hielo Patagónico Sur que se ha dado a tasas muy elevadas en las últimas décadas. El mismo ha experimentado un pronunciado y constante retroceso de su frente en sincronía con una notable disminución en su espesor. Analizando el comportamiento de la masa de hielo para el lapso de tiempo entre 1968 y noviembre de 2022, se calcula que el glaciar perdió aproximadamente 4 km^2 totales de superficie, entre un 15-20%. Desde 1968 el retroceso del frente de la lengua de hielo fue de unos 350 metros en dirección este-oeste, acelerándose significativamente a partir del año 2002. Además, concomitante con el fuerte retroceso glaciar es posible advertir un marcado adelgazamiento del cuerpo de hielo de al menos unos 60-75 metros, para el lapso 1952-2022, tomando como referencia un afloramiento de roca aborregada transversal al frente glaciar. Puntualmente, los números indican que para el período 2019-2022 la pérdida de hielo glaciar se aceleró, duplicando su tasa de retroceso con respecto a años anteriores. Simultáneamente con este retroceso, para el mismo lapso de tiempo, el lago Torre mostró un incremento con su tamaño estimado en unas 0.6 km^2. El proceso de deglaciación, observado tanto local como regionalmente en la mayoría de los glaciares patagónicos, constituye una respuesta clara de los cuerpos de hielo frente a las condiciones climáticas actuales representadas tanto por el incremento de la temperatura atmosférica como por la disminución de las precipitaciones durante las últimas décadas.

Palabras clave: Glaciar Torre, Cambio Climático, El Chaltén

INTRODUCCIÓN

El glaciar Torre se localiza en el ámbito de los Andes Patagónicos Australes, entre los 49º 16' y 49º 20' S, a pocos kilómetros al este y separado del Campo de Hielo Patagónico Sur. Lo conforman sus tres lenguas denominadas Torre, Adela y Grande (Lliboutry 1953). Tanto el glaciar como la porción argentina del Campo de Hielo se encuentran dentro de los dominios del Parque Nacional Los Glaciares (PNLG). En términos generales, la región exhibe un paisaje joven que ha experimentado diferentes glaciaciones a lo largo del Cenozoico (Caldenius 1932, Rabassa y Clapperton 1990, Strelin y Malagnino 1996, Rutter et al. 2012). Actualmente, la región se encuentra en transición desde el Último Máximo Glacial (UMG), ocurrido hace aproximadamente 18 mil años (Bendle et al. 2017), hacia las condiciones del presente. El retiro constante del glaciar Torre se encuentra en el contexto generalizado de retroceso experimentado por los glaciares pertenecientes al Campo de Hielo Patagónico Sur. En las últimas décadas, esta recesión

se ha dado a tasas considerablemente elevadas (Narusa y Aniya 1992, Skvarca et al. 2002, Masiokas et al. 2009, 2015). Este fenómeno de retroceso glaciar no es exclusivo de la región, ya que a escala global se ha observado un retroceso de los glaciares en todos los cordones montañosos, alcanzando tasas de 266.6 Gt/año entre los años 2000 y 2020 (Hugonnet et al. 2021). Particularmente, en los Andes Patagónicos Australes, durante el periodo 2000-2018, se ha registrado una de las tasas más altas de pérdida glaciar, alcanzando -18.3 ± 5.7 Gt/año (Dussaillant et al. 2019). En numerosos casos, el retroceso de los glaciares es concomitante con la formación de nuevos cuerpos de agua en los valles que van quedando libres de hielo o bien, de la expansión de la superficie de los lagos ya existentes.

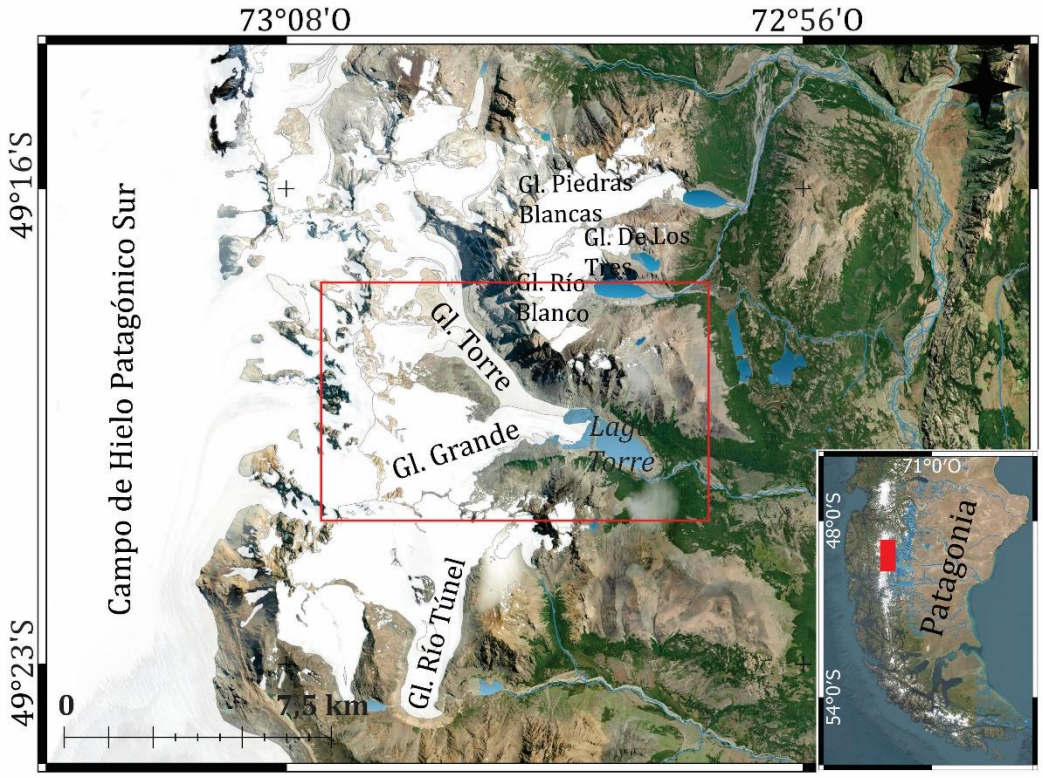


Figura 1. Ubicación del sector de estudio (recuadro rojo).

La persistencia a lo largo del tiempo del Campo de Hielo en la cordillera Andina Patagónica no se debe únicamente a su altitud topográfica y su localización austral, sino también a las condiciones meteorológicas particulares que caracterizan esta región (Malagnino 2008). Específicamente, el suroeste de Patagonia se encuentra fuertemente influenciado por los vientos del oeste (Miller 1976, Prohaska 1976, Villalba et al. 2003, Garreaud et al. 2013), donde la presencia de la cordillera actúa como un obstáculo para la masa de humedad que es recogida en el Pacífico, generando un gradiente de precipitación de oeste a este (Villalba et al. 2003).

Según los datos meteorológicos recopilados por la estación de guardaparques del PNLG, situada en El Chaltén a unos 400 m.s.n.m., la precipitación total anual es de 550 mm, distribuida de manera homogénea a lo largo de todo el año (Srur et al. 2018). La temperatura media en esa altitud y latitud, se encuentra alrededor de los 7ºC (Villalba et al. 2003, Srur et al. 2018). Hacia el oeste los datos indican una precipitación total anual

que oscila entre 1000 a 2000 mm, acompañada de una temperatura media anual de unos 6º C (Srur et al. 2018). Varios estudios han revelado que, en las últimas décadas, el aumento de temperatura ha sido más pronunciado en las regiones cordilleranas de Patagonia que en otras partes del país. Esta tendencia al calentamiento en las temperaturas medias serían las responsables del retroceso generalizado de glaciares en la extensa franja entre los 37ºS y 55ºS (Camilloni 2018). Además, a nivel estacional, se ha observado que los veranos tienden a prolongarse, con una disminución en la frecuencia de heladas y un incremento en la ocurrencia de olas de calor (Gulizia et al. 2022).

METODOLOGÍA

En este estudio, se llevó a cabo una reconstrucción y análisis temporal de la evolución geomorfológica del paisaje durante las últimas décadas, desde 1968 hasta noviembre de 2022. Aunque se obtuvieron fotografías históricas tomadas en 1934 y 1948 durante la recopilación de datos, se decidió centrar el análisis en el período entre 1968 y 2022, dado que la fotografía aérea que abarca todo el valle del glaciar Torre corresponde al año 1968. Abarcando dicho intervalo temporal se estimaron tres parámetros para caracterizar el paisaje glaciario. En primer lugar, se estimó el retroceso del frente del glaciar Torre; en segundo lugar, su pérdida de área y adelgazamiento y, finalmente, se analizó el incremento de la superficie del lago Torre. Si bien los resultados obtenidos constituyen solo una primera aproximación, brindan una idea de la magnitud del proceso de deglaciación por el que atraviesa el glaciar Torre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El glaciar Torre fluye desde el Campo de Hielo Patagónico Sur hacia el este, desembocando en su lago proglacial homónimo. Al analizar el comportamiento de la masa de hielo glaciar durante el periodo comprendido entre 1968 y 2022 (ver Fig. 2a), se estima que el glaciar experimentó una pérdida total de superficie de aproximadamente unos 4 km^2, lo que representa un 15-20%. Este dato sugiere una aceleración significativa de la tasa de pérdida (Schmidt et al. 2023). Además, se observa una pérdida gradual pero constante de superficie y adelgazamiento del glaciar Torre. Se estima que, hacia el año 1984, la superficie del glaciar era de unos 26.2 km^2, reduciéndose a unos 24.6 km^2 para el año 2005 (Masiokas et al. 2009). Datos más recientes indican una superficie de 22 km^2 (IANIGLA- CONICET y Mayds 2018, Schmidt et al. 2023). Es importante destacar que, aunque la pérdida total de superficie glaciar no revela una disminución importante consecuencia de la escala total del glaciar, si se evidencia una pérdida significativa de hielo en el frente del glaciar y en cuanto a su espesor.

En lo referido al retroceso del frente glaciario, se estima que desde 1968 la lengua de hielo ha retrocedido unos 350 metros en dirección oeste-este, experimentando una aceleración significativa a partir del año 2002. En 1968, el frente del glaciar Torre se extendía más allá del afloramiento de roca aborregada, evidenciando un considerable espesor de hielo. Esta conexión entre el frente glaciario y el afloramiento rocoso se aprecia en la secuencia de imágenes satelitales analizadas hasta el año 2007, y probablemente, dicho afloramiento actuó como un inhibidor de la aceleración del retroceso glaciario (ver Fig. 2a y b). A partir de este año, el glaciar pierde la conexión con la roca aborregada, continuando con su recesión y adelgazamiento.

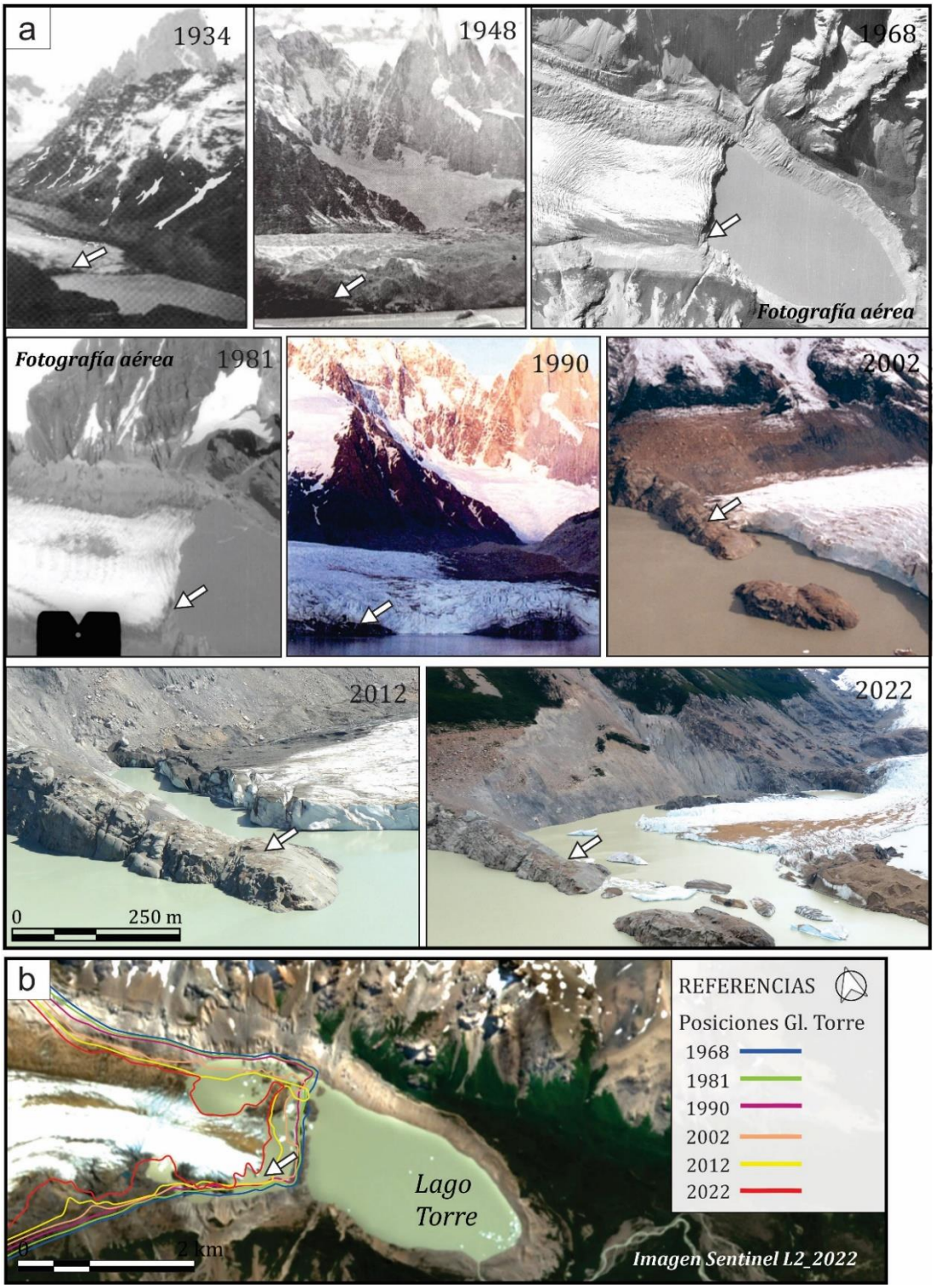


Figura 2. a) Cambios históricos del frente del glaciar Torre. Nótese el importante retroceso y adelgazamiento del glaciar. Fotografías de E. Standhardt (1934), M. Bertone (1948), IGN (1968, 1981), Cuadernos Patagónicos-Techint (1990), R. Villalba (2002), J. Blampied (2012), este trabajo (2022). b) Paleoposiciones del glaciar Torre los últimos 54 años.

Adicionalmente, se reconoce que la ablación del hielo glaciar próximo a las paredes del valle conduce a la formación de cuerpos de agua en las márgenes, contribuyendo al

aumento del área del lago Torre. Algunos de estos cuerpos de agua quedan desconectados del lago principal y están limitados por hielo glacial por un lado y afloramiento rocoso o material morénico por otro. La presencia y el crecimiento constante de estos cuerpos de agua implican una pérdida continua de soporte basal para las laderas que contienen al glaciar, dando lugar a una progresiva desestabilización ladera arriba.

En consonancia con el notorio retroceso glacial, se observa un marcado adelgazamiento del cuerpo de hielo de al menos unos 50-60 metros durante el periodo 1952-2009 (Masiokas et al. 2009). Siguiendo esta tendencia, se estima que la pérdida de espesor entre 2009 y 2022, ha sido de al menos 10 a 15 metros, utilizando como punto de referencia el afloramiento de roca aborregada ubicado transversalmente al frente glaciar (ver Fig. 2b). Específicamente, los datos señalan durante el intervalo 2019-2022, la pérdida de hielo glaciar experimentó una aceleración marcada, duplicando su tasa de retroceso en comparación con años anteriores (Schmidt et al. 2022).

DISCUSIÓN

En el sexto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC por sus siglas en inglés), se ha destacado que las formas de producción actuales, especialmente el uso de combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero y la deforestación extrema, han provocado un aumento en la temperatura de la superficie global de 1,1ºC promedio, durante el periodo 2011-2020, en comparación con el período preindustrial (1850-1900). Según las proyecciones, es probable que en el corto plazo se alcancen los +1,5ºC, para el periodo 2030-2035 (IPCC 2022).

Este aumento de temperatura ha tenido sus impactos en la atmósfera y los océanos, manifestándose en la disminución de las cantidades de nieve y hielo, el aumento del nivel del mar y un incremento en las concentraciones de gases efecto. Desde 1850, cada una de las últimas tres décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier década previa (Villalba 2019). Al analizar las tasas de calentamiento, se observa una aceleración significativa: de 0,07º C/década durante el período 1880-2017; 0,17º C/década entre 1960-2017; 0,20º C/década entre 1990-2017 y un incremento de 0,95º C entre 2008-2017 respecto del período preindustrial (IPCC 2022). Estos datos indican una clara tendencia hacia un calentamiento acelerado en las últimas décadas.

En las regiones cordilleranas de Patagonia, se evidencia una clara tendencia al calentamiento en las temperaturas medias, fenómeno que se vincularía con el retroceso generalizado de los glaciares en la región (Camilloni 2018). Esta variación climática se refleja a nivel estacional, donde los veranos tienden a ser más prolongados, mientras que los inviernos tienden a ser más moderados. Asimismo, se ha registrado una disminución en la ocurrencia de heladas y un incremento en la frecuencia de olas de calor (TCNCC 2015). El glaciar Torre, en particular, ha experimentado una reducción significativa en su extensión y volumen, como lo revelan las series temporales analizadas en las últimas décadas. Esta disminución en el área, el espesor y el frente del glaciar se ha acelerado. La significativa pérdida de hielo por el retiro del glaciar desde el UMG, ha provocado la desestabilización del paisaje montañoso, fenómeno que persiste en la región.

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se llevó a cabo la reconstrucción del área del glaciar Torre durante los últimos 54 años. El análisis de las fluctuaciones del glaciar revela un patrón de cambio

coherente con la tendencia general desarrollada en la región de los Andes Patagónicos Australes.

Los cambios en el área y la posición del frente indican un notable retroceso a lo largo de las últimas cinco décadas. El glaciar ha experimentado una pérdida de entre el 15-20% de su superficie y ha retrocedido su frente unos 350 m, desde 1968 hasta 2022. Al examinar la dinámica reciente del glaciar Torre, se observa una aceleración significativa en la tasa de retroceso de su frente, así como en la disminución de su espesor. Concomitantemente, durante el período 1968-2022, el área del lago Torre ha experimentado un incremento en su tamaño.

Las respuestas de los cuerpos de hielo al cambio climático involucran una compleja cadena de procesos. Factores como la temperatura, la radiación solar, la precipitación, el viento y la nubosidad, influyen en el balance de masa y energía de los glaciares (Villalba 2019). La reducción de los glaciares debido al aumento de la temperatura representa una clara respuesta del impacto del cambio climático. En caso de que estas condiciones persistan en el tiempo, las proyecciones señalan que los glaciares continuarán perdiendo hielo significativamente.

REFERENCIAS

Bendle, J. M., Thorndycraft, V. R. y Palmer, A. P. The glacial geomorphology of the Lago Buenos Aires and Lago Pueyrredón ice lobes of central Patagonia. Journal of Maps 13: 654-673 (2017).

Caldenius, C. C. Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego. Una investigación regional, estratigráfica y geocronológica- Una comparación con la escala geocronológica sueca. Geografiska Annaler 14: 1-164 (1932).

Camilloni, I. A. Argentina y el cambio climático. Ciencia e Investigación 68(5): 5-10 (2018).

Dussaillant, I., Berthier, E., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. and Ruiz, L. Two decades of glacier mass loss along the Andes. Nature Geoscience, 12(10): 802-808 (2019).

Garreaud, R., Lopéz, P., Minvielle, M. y Rojas, M. Large-scale control on the Patagonian climate. Journal of Climate 26: 215-230 (2013).

Gulizia, C. N., Raggio, G. A., Camilloni, I. A. y Saurral, R. I. Changes in mean and extreme climate in southern South America under global warming of 1.5º C, 2º C, and 3º C. Theoretical and Applied Climatology 150(1): 787-803 (2022).

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F. y Kääb, A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. Nature 592(7856): 726-731 (2021).

IANIGLA-CONICET y Mayds. Informe de las subcuencas de los río de Las Vueltas y Túnel, cuenca del río Santa Cruz, Parque Nacional Los Glaciares (2018).

IPCC Sixth Assessment Report. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, 6to reporte sobre el cambio climático (2022). https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/

Lliboutry, L. Snow and ice in the Monte Fitz Roy region (Patagonia). Journal of Glaciology 2(14): 255-261 (1953).

Malagnino, E. El Campo de Hielo Patagónico Sur. Un pasado, un presente… y un futuro incierto. Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 46, II, 461 p., Buenos Aires (2008).

Masiokas, M. H., Luckman, B. H., Villalba, R., Delgado, S., Skvarca, P. y Ripalta, A. Little ice age fluctuations of small glaciers in the Monte Fitz Roy and Lago del Desierto areas, South

Patagonian Andes, Argentina. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology 281(3-4): 351-362 (2009).
Masiokas, M. H., Delgado, S., Pitte, P., Berthier, E., Villalba, R., Skvarca, P. y Zalazar, L. Inventory and recent changes of small glaciers on the northeast margin of the Southern Patagonia Icefield, Argentina. Journal of Glaciology 61(227): 511-523 (2015).
Miller, A. The climate of Chile. Schwertfeger W(ed) Climates of Central and South America. Worl survey of climatology, Amsterdam 12: 113-145 (1976).
Naruse, R. y Aniya, M. Outline of Glacier Research Project in Patagonia, 1990. Bulletin of Glacier Research 10: 31-38 (1992).
Prohaska, F. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. Climates of Central and South America, Amsterdam 12: 13-112 (1976).
Rabassa, J. y Clapperton, C. Quaternary glaciations of the southern Andes. Quaternary Science Reviews 9: 153-174 (1990).
Rutter, N., Coronato, A., Helmens, K., Rabassa, J. y Zárate, M. Glaciations in North and South America from the Miocene to the Last Glacial maximum: comparisons, linkages and uncertainties. Springer 67p., New York (2012).
Schmidt, D., Winocur, D. y Pitte P. Caracterización y evolución temporal de los deslizamientos activos en las laderas de los cerros Solo y Techado Negro, valle del glaciar Torre/Grande, provincia de Santa Cruz. VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 67-68, San Juan (2022).
Schmidt, D., Winocur, D., Pitte P., y Amigo, J. Condicionantes geológicos en la ocurrencia y evolución de los procesos de remoción en masa en la cuenca del río Fitz Roy, provincial de Santa Cruz. Revista de la Asociación Geológica Argentina 80, 4 (2023).
Strelin, J. y Malagnino, E. Glaciaciones pleistocenas del lago Argentino y alto valle del río Santa Cruz. 13º Congreso Geológico Argentino 4: 311-325 (1996).
Skvarca, P., De Angelis, H., Naruse, R., Warren C. R. y Aniya, M. Calving rates in fresh wáter: new data from southern Patagonia. Annals of Glaciology 34: 379-384 (2002).
Srur, A. M., Villalba, R., Rodríguez-Catón, M., Amoroso, M. M., y Marcotti, E. Climate and Nothofagus pumilio establishment at upper tree-lines in the Patagonian Andes. Frontiers in Earth Science 6:57 (2018).
TCNCC. Resumen Ejecutivo de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015).
Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J. A., Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, J. C., Roig, F. A., Schmelter, A., Wolodarsky, A. y Ripalta, A. Large-scale temperatura changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. Climate Change 59: 177-232 (2003).
Villalba, R. Glaciares y cambio climático, Atlas de glaciares de la Argentina. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 200-207 (2019).

BIOPOLÍMEROS Y MICROBIOTA EN MUESTRAS DE SEDIMENTO ESTUARINAS-COSTERAS

Evelyn L. Schwab[a], Romina Sánchez[b,c], Ana M. Martínez[a] , Lorena Brugnoni[d], Valentina Farias-Elorriaga[a] y Florencia Biancalana[b]

[a]*Departamento de Química-Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, ARGENTINA*
[b]*Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), Universidad Nacional del Sur (UNS-CONICET), Bahía Blanca, ARGENTINA*
[c]*Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, ARGENTINA*
[d]*Instituto de Ciencias Biológicas y Biomédicas del Sur (INBIOSUR), Universidad Nacional del Sur(UNS-CONICET), Bahía Blanca, ARGENTINA*

e-mail: biancaf@criba.edu.ar

RESUMEN

Los biopolímeros, quitina y quitosano, son fuente de carbono y nitrógeno resultantes de procesos de degradación llevados a cabo por microorganismos presentes en los sistemas marinos. El presente trabajo multidisciplinario, consistió en la determinación de quitina, quitosano, materia orgánica (MO), carbohidratos (CH), clorofila a (Clor. a) y feopigmentos (Feo.) del sedimento de cuatro estaciones de muestreo: Monte Hermoso (MH), Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM), durante febrero 2023. Se evaluó la presencia microbiana en sedimento, con el objetivo de asociar éstos con el proceso de degradación. Las mayores concentraciones de quitina (4,79±0,68 mg/g) y quitosano (0,32±0,01mg/g) se obtuvieron en VM, acompañadas de un alto contenido de MO (27,97±6,59 mg/g). Los mínimos valores de éstos (1,92±0,66 mg/g-quitina y 0,21±0,04 mg/g-quitosano) así como de MO (7,63±1,03 mg/g) y CH (5,90±1,23 mg/g) se hallaron en MH. Se encontraron diferencias para ambos biopolímeros y la MO, entre estaciones de muestreo (Prueba Kruskal-Wallis, p≤0,05). Los mayores valores de Clor. a (4,67±1,90 µg/g) y de Feo. (3,50±2,71 µg/g) se obtuvieron en VM, contrariamente los más bajos se hallaron en MH (0,24±0,12 µg/g y 0,04±0,03 µg/g, respectivamente). El recuento más elevado de bacterias totales fue de 2,8x10^5 UFC/g en VM. El recuento de hongos se incrementó de 2x10^2 UFC/g en MH a 1,5x10^3 UFC/g en VM. Se encontraron diferentes especies de los siguientes géneros de hongos filamentosos: Alternaria, Penicillium, Cladosporium, Trichoderma y Drechslera. Se deduce que ambos biopolímeros presentaron un patrón espacial con máximos en VM y mínimos en MH, relacionado seguramente con el aporte de éstos por organismos meiobentónicos, las características granulométricas y las condiciones ambientales. A su vez el aumento de MO y de bacterias y hongos en VM, sugiere la degradación de éstos a compuestos más simples ej. carbohidratos, potenciado este proceso por condiciones ambientales estivales.

Palabras Clave: Biopolímeros, Microbiota, Sedimento, Playa, Estuario de Bahía Blanca.

INTRODUCCIÓN

Los polímeros, quitina y quitosano, son biomateriales típicos y únicos marinos, cuyo estudio se ha incrementado en las últimas siete décadas (Joseph et al, 2021). La quitina es un polisacárido natural producido en grandes cantidades, principalmente por crustáceos, en los sistemas acuáticos, constituyendo el polímero natural más abundante después de la celulosa (Gooday et al, 1991; Souza et al, 2011; Younes I. and Rinaudo M., 2015). El quitosano es un polisacárido lineal derivado principal de la degradación de la

quitina y está compuesto de cadenas distribuidas aleatoriamente de β-(1-4)-D-glucosamina (unidades desacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (Younes I. and Rinaudo M., 2015). Asimismo, el quitosano puede encontrarse naturalmente en las paredes celulares de algunos hongos, los cuales son el aporte directo de este polímero a los sistemas acuáticos (Pochanavanich P. and Suntornsuk, W., 2002).

Las producciones de ambos biopolímeros en sistemas marinos han sido subestimadas debido a su degradación por parte de microorganismos capaces de realizar el reciclaje de éstos (ej. género *Vibrio*, hongos y diatomeas) (Vrba et al, 1997; Swiontek-Brzezinska et al, 2007; Beier S. and Bertilsson S., 2013). Por este motivo y a pesar de la producción continua de quitina, altamente insoluble en agua, los sedimentos marinos contienen, en general, bajas concentraciones de quitina y quitosano (Hillman et al, 1989; Poulicek M. and Jeuniaux C., 1991). Las bacterias quitinolíticas, tienen un rol importante en los ciclos biogeoquímicos, contribuyendo al aporte carbono y nitrógeno, en sistemas marinos (Gooday, 1990; Souza et al, 2011). Por otro lado, el rol de los hongos acuáticos es objeto de estudio reciente, y aunque este aún no es claro, se tienen pruebas de que estos desempeñan un papel importante en la producción y degradación de la quitina, en sistemas acuáticos (Swiontek-Brzezinska et al, 2007). Por ende, al igual que las bacterias, los hongos cumplen un rol importante en la generación de energía que se incorpora al flujo y productividad de un ecosistema, por su existencia como fuente constituyente para satisfacer las necesidades básicas de carbono orgánico en los niveles tróficos superiores (Hyde et al, 1989).

En particular en el estuario de Bahía Blanca (EBB), estudios realizados sobre la cuantificación de quitina y quitosano en distintas fracciones del seston han corroborado que la fuente principal de estos son crustáceos (zooplankton) (Biancalana et al, 2019; Biancalana, F. and Berasategui, A. A., 2020). La presencia de bacterias y hongos como principales degradadores de este polímero y posterior hallazgo de quitosano en muestras naturales afirman procesos de degradación de la quitina y/o aporte de éste por hongos marinos (Biancalana et al., 2017, Biancalana et al, 2019; Díez et al, 2023). Hay información relacionada con la producción de carbohidratos por matas microbianas y la caracterización de éstas en zonas estuarinas (Pan et al, 2012; Fernández et al, 2016), así como la relación de las condiciones ambientales y la comunidad macrobentónica de zonas de playas (Carcedo et al, 2015). La determinación de quitina y quitosano en sedimentos estuarinos y costeros del EBB y playas como MH, es nula siendo este trabajo preliminar la base de nueva información.

En el presente trabajo multidisciplinario se realizó la determinación de quitina y quitosano, y la asociación con la presencia de microorganismos, principalmente hongos marinos, como componente de sedimentos estuarinos y costeros. Además, se llevó a cabo el análisis de la materia orgánica, carbohidratos, clorofila a y feopigmentos del sedimento, con el objetivo de establecer su asociación con la presencia de biopolímeros y microorganismos, y de esta manera vincular estos componentes con el proceso de degradación.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estuario de Bahía Blanca (38° 42´-39° 25 S, 61°50-62°22’ O) y la costa de MH (38°59´24’ S y 61° 17’ 28’O) constituyeron el área de estudio de este trabajo (Fig. 1). Las muestras de sedimento fueron extraídas en cuatro estaciones de muestreo: Monte

Hermoso (MH), Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM), en febrero 2023 (Fig.1).

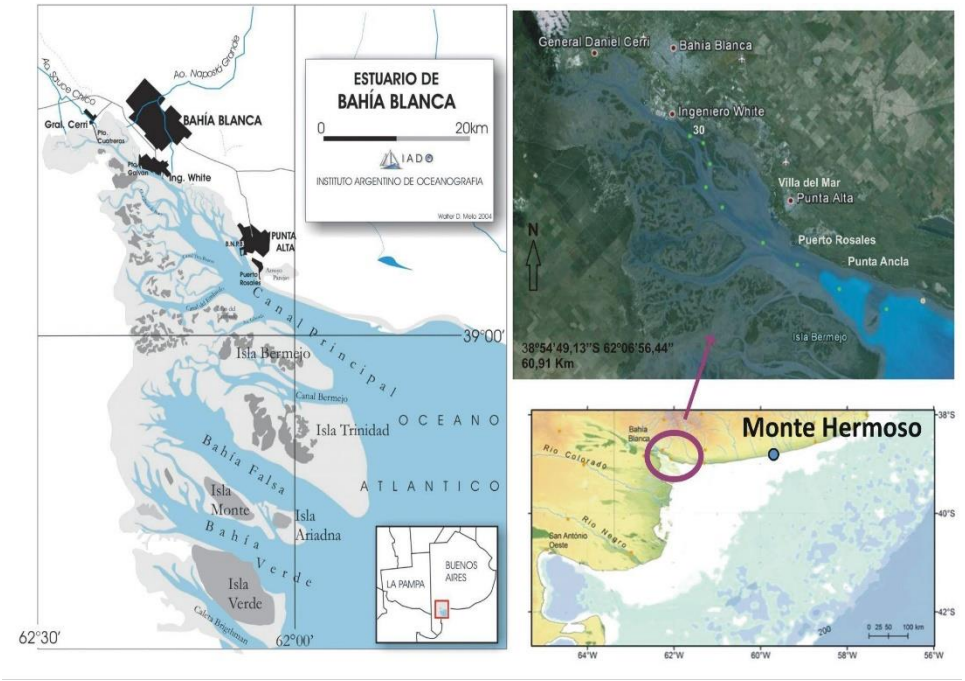


Figura 1. Mapa del área de estudio señalando la ubicación de las estaciones Monte Hermoso (MH), Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM).

Las condiciones ambientales de temperatura (MH y PA: 24 °C, PR: 25°C y VM: 26°C) y salinidad (MH: 30, PA: 26, PR: 32 y VM: 33) se tomaron en el momento del muestreo utilizando un Sensor multiparamétrico PCE-PHD1. Las muestras de sedimento se colectaron en bolsitas de polietileno y cajas de Petri estériles, y se trasladaron al laboratorio refrigeradas, evitando la exposición a la luz, usando conservadoras portátiles con gel frío. Posteriormente se pesó dos a cinco gramos de sedimento para realizar las determinaciones de: quitina, quitosano, materia orgánica (MO), carbohidratos (CH), clorofila a (Clor. a) y feopigmentos (Feo.)

La cuantificación de quitina se realizó por medio de la medición fluorométrica del exceso de WGA (Wheat germ agglutinin-Aglutinina de germen de trigo) a través de la reacción con isotiocianato de fluoresceína (FITC) en un espectrofotómetro de fluorescencia (método modificado de Montgomery et al, 1990). La determinación de las concentraciones de quitosano se efectúo a través de la medición colorimétrica con Cibacron Brilliant Red 3B-A en un espectrómetro de fluorescencia (Muzzarelli, 1998). La determinación de la concentración de Clor. a y Feo. se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Lorenzen C. and Jeffrey J., 1980 mediante un espectrofotómetro UV-visible Agilent Cary 60. La determinación cuantitativa de CH se realizó mediante el método del fenol-ácido sulfúrico (Dubois et al, 1956) previa hidrólisis ácida. La materia orgánica se estimó usando el método de pérdida por ignición (LOI: Loss On Ignition), descrito por Buchanan J. B. and Kain J. M.,1971.

El análisis microbiológico se realizó en medios de cultivo específicos para la búsqueda de bacterias totales y hongos en medio marino (UFC/g). El análisis cualitativo de hongos

se efectúo mediante técnicas tradicionales de microscopía óptica. Agar para Recuento en Placa (PCA, Britania) y Agar Extracto de Levadura-Cloranfenicol (YGC, Merck). Ambos medios se prepararon en agua de mar filtrada proveniente de MH (zona prístina). Las cepas se aislaron en agar papa dextrosa (PDA) o agar extracto de malta (MEA) preparados con agua de mar de MH. Las colonias se observaron con lupa binocular para la descripción de las características macroscópicas. Los colores se clasificaron según la carta de color de Rayner R. W. A.,1970. Para el estudio de las estructuras microscópicas se utilizaron como medios de montaje ácido láctico, hidróxido de potasio o agua de red, y cuando se requirió un mayor contraste se usó floxina (1%) o azul de algodón para teñir. La observación se realizó con un microscopio óptico de campo claro Leica DM2000, se tomaron fotomicrografías con una cámara Leica ICC50 HD adaptada y con un ocular micrométrico se realizaron las medidas de las distintas estructuras.

Los datos de biopolímeros (quitina y quitosano) así como lo datos de MO y CH no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad por lo que se aplicó análisis no paramétrico. Se utilizó la prueba H de Kruskal-Wallis para detectar diferencia en la concentración de quitina, quitosano, CH y MO en estaciones de muestreo: MH, PA, PR y VM. El nivel de significación utilizado fue de $p = 0,05$. Se aplicó la prueba U de Mann-Whitney con corrección de Bonferroni ($p=0,008$; nivel de significación de p de 0,05 sobre el número de comparaciones de apares- 4 estaciones, seis comparaciones de a pares) para determinar entre cuales estaciones se daban las diferencias de concentración de biopolímeros, MO y CH. Las pruebas estadísticas se realizaron con SPSS 15.0. Los gráficos de las concentraciones de biopolímeros, MO, CH, Clor. a, Feo., y Frecuencia de Ocurrencia (FO%) se realizaron en Excel. La Frecuencia de Ocurrencia (FO%) se calculó en base a la presencia y ausencia de los hongos filamentosos en total y por estaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mayores concentraciones de quitina (4,79±0,68 mg/g) y quitosano (0,32±0,01mg/g) se obtuvieron en VM, acompañadas de un alto contenido de MO (27,97±6,59 mg/g) (Fig.2). Los mínimos valores de éstos (1,92±0,66 mg/g-quitina y 0,21±0,04 mg/g-quitosano) así como de MO (7,63±1,03 mg/g) y carbohidratos (5,90±1,23 mg/g) se hallaron en MH (Fig. 2). Se encontraron diferencias para ambos biopolímeros y la MO, entre estaciones de muestreo (Prueba Kruskal-Wallis, $p\leq0,05$) (Tabla I). La concentración de quitosano de VM se diferenció significativamente, por ser máxima en esa estación (4,79±0,68 mg/g) del resto de las estaciones (Prueba de Mann-Whitney: $U=0$, $p=0,004$, MH; $U=0$, $p=0,004$, PA; $U=1$, $p=0,006$, PR). Además, la concentración de MO de MH se diferenció de la concentración de PR y VM (Prueba de Mann-Whitney: $U=0$, $p=0,004$, PR; $U=0$, $p=0,004$, VM) siendo las concentraciones de MO en estas últimas estaciones mayor (24,44 ±3,62 y 27,97±6,59 mg/g, respectivamente) (Fig.2).

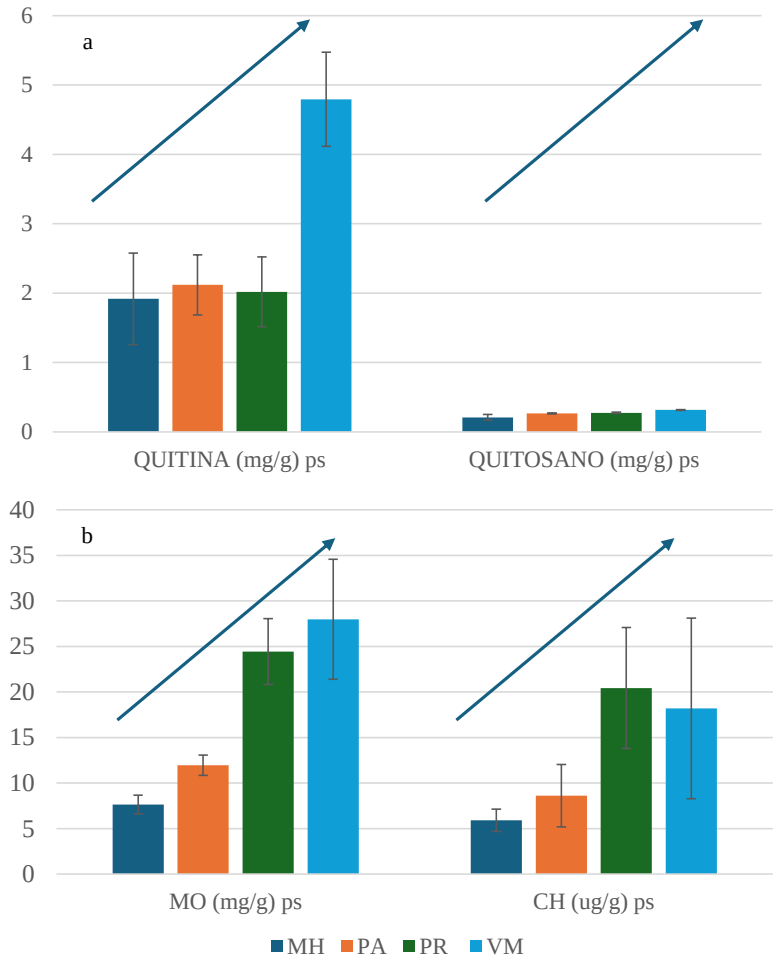


Figura 2. a. Concentraciones en peso seco (ps) de quitina (mg/g), quitosano (mg/g), b. materia orgánica (MO-mg/g) y carbohidratos (CH-µg/g) en Monte Hermoso (MH); Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM) en febrero 2023.

Tabla I. Prueba de Kruskal Wallis para la concentración de quitina, quitosano, materia orgánica (MO) y carbohidratos (CH). (gl: grados de libertad, p=0,05)

	Quitina	Quitosano	MO	CH
H de Kruskal-Wallis	9,03	16,33	14,70	6,87
gl	3,00	3,00	3,00	3,00
p	**0,03**	**0,00**	**0,00**	0,08

Se dedujo que las concentraciones de biopolímeros, en particular quitina, disminuye a medida que nos alejamos del EBB. Las concentraciones de biopolímeros son mayores en estaciones (PR y VM) donde hay un aporte mayor de éstos por parte de organismos: hongos filamentosos (75% EBB, ver Fig. 4) y microfitobentos. Sumado a lo anterior, las concentraciones de MO y CH presentaron el mismo patrón, aumentando desde MH hacia

el interior del EBB (Ver Fig. 3). Esto se relaciona con las características del suelo que va desde arena (MH) a limo-arcilla (VM) (Gelós et al, 2004y la presencia de microfitobentos conformando las matas microbianas (Fernández et al, 2016).

El microfitobentos, formado mayoritariamente por cianobacterias y diatomeas colonizan la parte superficial del sedimento, consolidando el sustrato de la zona intermareal de las planicies de marea y marisma, favoreciendo la deposición o retención de sedimento en pleamar (Pan et al, 2012; Fernández et al, 2016). Esta comunidad es responsable de la secreción de grandes cantidades de sustancias poliméricas extracelulares (EPS), los cuales son producidos con distintos propósitos como la motilidad de los microorganismos, protección contra la desecación y la depredación, adsorción de materia orgánica disuelta, fijación a la superficie y estabilización de la llanura mareal (Decho 1990; Pan et al, 2012). De esta manera, se forma un biofilm en el cual los procesos de producción y degradación de biopolímeros, de MO y CH, es también factible por la presencia de organismos (copépodos, diatomeas y hongos) (Biancalana et al, 2019; Diez et al, 2023) (Ver Fig. 3). De esta misma manera la vegetación *Spartina alterniflora* y *Sarcocornia ambigua*, la cual es posible que albergue una gran micobiota asosciada (Calabon et al, 2021), y la presencia de organismos bentónicos como por ej. del cangrejo barrenador *Neohelice granulata*, en el área intermareal (Carcedo et al, 2013; Angelletti S. and Crvellini P. M., 2015), proporcionan un aporte adicional de quitina y quitosano junto con MO. En la estación PR se suma el aporte de MO provenientes de aguas residuales (Spetter et al, 2015).

Los mayores valores de Clor. a (4,67±1,90 µg/g) y de Feo. (3,50±2,71 µg/g) se obtuvieron en VM, contrariamente los más bajos se hallaron en MH (0,24±0,12 µg/g y 0,04±0,03 µg/g, respectivamente) (Fig. 3).

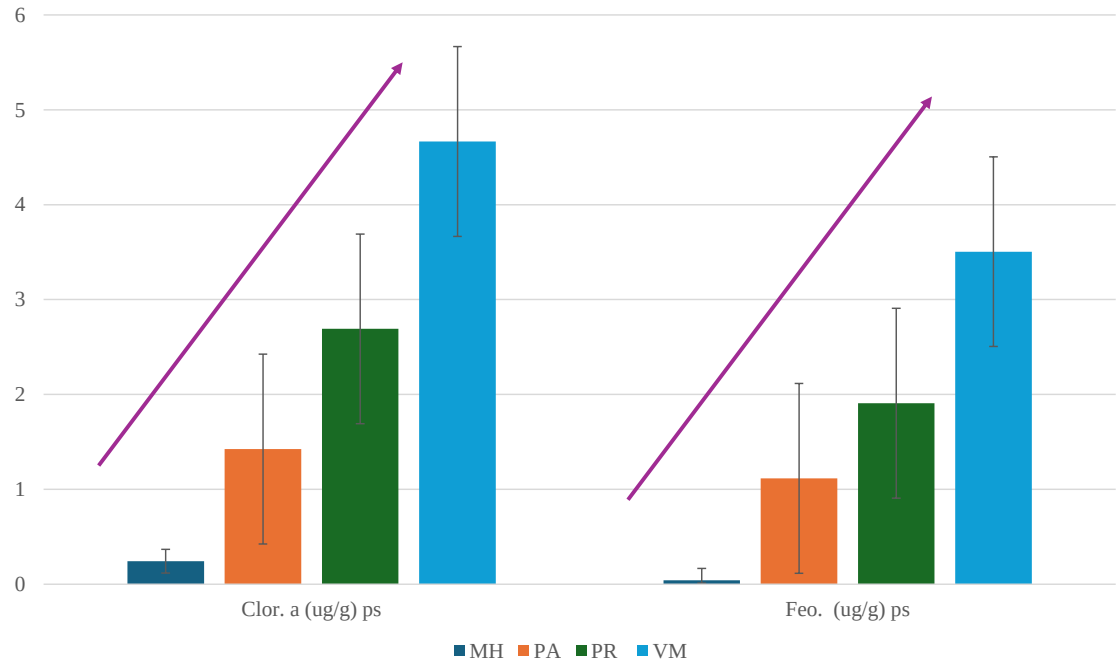


Figura 3. Concentración de Clororfila a (Clor. a) y feopigmentos (Feo.) en peso seco (ps: µg/g) en Monte Hermoso (MH), Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM) en febrero 2023.

Los patrones de la concentración de Clor. a y Feo. siguen la distribución espacial de la concentración de biopolímeros, MO y CH, disminuyendo desde VM hacia MH (Ver Fig. 2 y 3). La clorofila a es ampliamente utilizada para estimar la biomasa de fitoplancton y presenta una dispersión espacial que depende de las condiciones ambientales (disponibilidad de luz y nutrientes, temperaturas, vientos y mareas, así como el pastoreo por parte del zooplancton) (Spetter et al, 2015). También, se tiene el conocimiento de que procesos tales como la fotosíntesis, producción y degradación de polímeros, son llevados a cabo por el microfitobentos en sedimentos en época estival (Hillman et al, 1989).

El recuento más elevado de bacterias heterótrofas totales fue de 2,8x105 UFC/g en VM. El recuento de hongos se incrementó de 2x102 UFC/g en MH a 1,5x103 UFC/g en VM. Se lograron 17 aislamientos fúngicos entre todas las estaciones de muestreo, identificadas entre los géneros *Alternaria, Cladosporium, Drechslera, Penicillium* y *Trichoderma* (Fig. 4). Todas las especies fúngicas identificadas pertenecen al Phylum Ascomycota. Entre ellos *Alternaria*, *Cladosporium* y *Penicillium* fueron los géneros mayormente representados en la mayoría de las estaciones. *Trichoderma* únicamente se encontró en VM y *Drechslera* en PA. Las especies dematiáceas (*Alternaria*, *Cladosporium y Drechslera*) son de color oscuro ya que producen melanina en las paredes celulares por lo que son capaces de enfrentar condiciones de deshidratación y radicación alta (Gunde-Cimerman et al, 2000). Por otra parte, el hecho de encontrar especies con estructuras hialinas, es decir sin pigmentación oscura (*Penicillium* y *Trichoderma*) se asocia con la presencia de especies psicrotolerantes, es decir que tienen temperaturas óptimas de crecimiento entre los 20 y 30 °C, pero también toleran altas temperaturas (alrededor de 35 °C) (Musa et al, 2018). Esto concuerda con el hecho de que los muestreos fueron realizados en verano donde la salinidad y la temperatura alcanzan los valores más altos (26 °C y 33 respectivamente en VM) y la radiación es más intensa. Se sabe que tanto los hongos, productores de quitina y quitosano, y las bacterias producen enzimas responsables de degradar la quitina en el quitosano, que son favorecidas por las condiciones ambientales de la época estival (Hillman et al, 1989; Gooday et al, 1990). Además, cumplen un rol en la transformación de materia orgánica con implicaciones para el ciclo global del carbono (Hyde et al, 1989; Swiontek-Brzezinska et al, 2007).

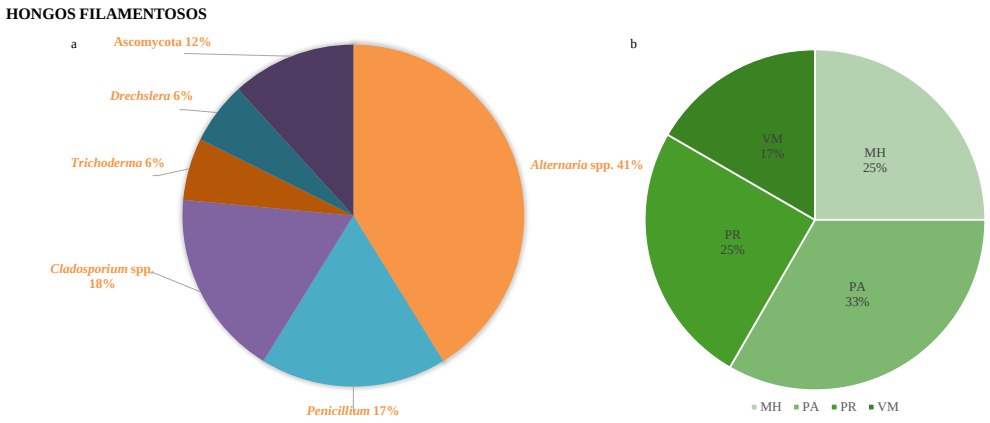


Figura 4. a. Porcentaje de Frecuencia de Ocurrencia (FO%) de los géneros de hongos filamentosos presentes en total y **b.** en las cuatro estaciones de muestreo: Monte Hermoso (MH); Punta Ancla (PA), Puerto Rosales (PR) y Villa del Mar (VM) en febrero 2023.

De esta manera se corroboran los resultados de este trabajo, sugiriéndose que el patrón espacial observado en el EBB y MH en verano (febrero 2023) está vinculado a la presencia de organismos productores y degradadores de quitina y quitosano, así como el aporte de MO y CH, regulado por las condiciones favorables (temperatura, salinidad, intensidad de la luz, entre otros).

CONCLUSIONES

Los biopolímeros analizados presentaron máximos en zonas estuarinas, como VM y mínimos en la zona de playa de MH. Este patrón se asoció con el aporte de éstos por organismos meiobentónicos, las características granulométricas (arcilla-limo, arena) y las condiciones ambientales del verano. Sumado a esto, el aumento de MO y de bacterias y hongos en VM, indica que en el sedimento se llevan a cabo procesos de degradación que aparentemente son favorecidos por las condiciones ambientales estivales.

Desde un punto de vista biogeoquímico, los biopolímeros, tanto la quitina como el quitosano, juegan un papel fundamental como fuente de carbono y nitrógeno en los sistemas marinos. Asimismo, la participación de hongos marinos, de escasa información en los sistemas estuarinos costeros (EBB) y de playas (MH), demuestra ser activa y fundamental en el reciclaje, en particular, de biopolímeros y general de la materia orgánica. Por lo tanto, la identificación de sus fuentes y sus dinámicas (procesos de producción y degradación) es relevante. La incorporación de la biota asociada a dichos procesos, bacterias y hongos marinos es clave, requiriéndose a futuro trabajos multidisciplinarios e integrados para vislumbrar las funciones de éstos en los sistemas marinos.

REFERENCIAS

Angelletti, S., and Cervellini P. M. Population structure of the burrowing crab Neohelice granulata (Brachyura, Varunidae) in a southwestern Atlantic salt marsh. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 43(3): 539-547 (2015).

Beier, S., and Bertilsson, S. Bacterial chitin degradation-mechanisms and ecophysiological strategies. *Front. Microbiol.* 4:149 (2013)

Biancalana, F., and Berasategui, A. A. Size-fractionated chitin contribution to seston, with linkages to the copepod Acartia. *Ocean. Coast. Res*. https:// doi. org/ 10. 1590/ S2675- 28242 02006 8299 (2020).

Biancalana, F, Fernandez-Severini, M. D., Villagran, D. M., Berasategui, A. A., Tartara, M. N., Spetter, C. V., Lara, R. J. Assessment of chitin variation in seston of a temperate estuary (Bahia Blanca, Argentina). *Environ. Earth. Sci.* 78(1):1-14 (2019).

Biancalana, F., Kopprio, G., Lara, R. J., Alonso, C. A. protocol for the simultaneous identification of chitin-containing particles and their associated bacteria. *Syst. Appl.Microbiol*. 40(5):314-320 (2017).

Buchanan, J. B. and Kain, J. M. Measurement of the physical and chemical environment, in Methods for the Study of Marine Benthos, Holme, N. A. and McIntyre, A. D., eds., Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1971.

Calabon, M. S., Jones, E. B. G., Promputtha, I., Hyde, K. D. Fungal Biodiversity in Salt Marsh Ecosystems. *J. Fungi*, 7And 648.https://doi.org/10.3390/jof7080648. (2021).

Carcedo, M. C., Fiori, S. M., Bremec, C. S., Macrobenthic surf zone communities of temperate sandy beaches: spatial and temporal patterns. *Mar. Ecol.* 36, 326–336 (2015).

Decho, A. W. Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. Oceanogr. Mar. Biol. *Annu. Rev.* 28:73-153(1990)

Diez, A., Berasategui, A.A., Fernández, E., Spetter, C., Biancalana, F. Exploratory analysis of chitosan in marine seston samples from a temperate estuary (Argentina). *Sustainable Water Res. Manag.* https://doi.org/10.1007/s40899-023-00932-0 (2023).

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., Smith, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28, 350-356 (1956).

Fernández, E. M., Spetter, C. V., Martínez, A. M., Cuadrado, D. G., Avena, M. J., Marcovecchio, J. E. Carbohydrate production by microbial mats communities in tidal flat from Bahı´a Blanca Estuary (Argentina). *Environ. Earth Sci.* 75:641 (2016).

Gelós, E.M., Marcos, A.O., Espagnuolo, J.O. y Schilizi, R. A. Textura y minerología de sedimentos. En: Piccolo MC, Hoffmeyer MS (eds) Ecosistema del Estuario de Bahía Blanca, Instituto Argentino de Oceanografía, Bahía Blanca, Argentina, pp 43-50 (2004).

Gooday, G. W. The ecology of chitin degradation. Advances in microbial ecology. Springer, pp 387-430 (1990).

Gooday, G. W., Prosser, J. I., Hillman, K., Cross, M.G. Mineralization of chitin in an estuarine sediment: the importance of the chitosan pathway. *Biochem. Syst. Ecol*. 19(5):95–400 (1991).

Gunde-Cimerman, N., Zalar, P., de Hoog, S. and Plemenitas A. Hypersaline waters in salterns - natural ecological niches for halophilic black yeasts. FEMS Microbiol. Ecol. 32: 235-240 (2000).

Hillman, K., Gooday, G. W., Prosser, J. I. The mineralization of chitin in the sediments of the Ythan Estuary, Aberdeenshire Scotland. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 29(6):601–612(1989).

Hyde, K. D., Gareth Jones, E. B.; Leaño, Pointing, S. B., Poonyth, A. D., Vrijmoed, L. L. P. Role of fungi in marine ecosystems. Biodiversity Conserv. 7, 1147-1161 (1989).

Joseph, Sh. M., Krishnamoorthy, S., Paranthaman, R., Moses, J.A., Anandharamakrishnan, C. Carbohydrate Polymer *Technologies and Applications* 2:100036 (2021).

Lorenzen, C. and Jeffrey, J. Determination of chlorophyll in seawater. *UNESCO Tech Pap Mar Sci.* (1980).

Montgomery, M. T., Welschmeyer, N. A., Kirchman, D. L. Simple assay for chitin: application to sediment trap samples from the subarctic Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 64(3):301-308 (1990).

Musa, H., Kasim, F.H., Nagoor-Gunny, A.A., and Gopinath, S.C.B. Salt-adapted moulds and yeasts: Potentials in industrial and environmental biotechnology. *Process Biochemistry* https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.03.026 (2018).

Muzzarelli, R. A. Colorimetric determination of chitosan. *Anal Biochem.* 260(2):255-257 (1998).

Pan, J., Bournod, C. N., Pizani, N.V., Cuadrado, D. G., Carmona, N. B. Characterization of Microbial Mats from a Siliciclastic Tidal Flat (Bahia Blanca Estuary, Argentina). *Geomicrobiol. J.* 30(8) 665-674. (2012).

Pochanavanich, P. and Suntornsuk, W. Fungal chitosan production and its characterization. *Lett App Microbiol*. 35(1):17–21 (2002).

Poulicek, M. and Jeuniaux, C. Chitin biodegradation in marine environments: an experimental approach. *Biochem. Syst. Ecol.* 19:385–394 (1991)

Rayner, R. W. A mycological colour chart. A mycological colour chart. Commonwealth Mycological Institute, Kew, Surrey, and British Mycological Society. 1970.

Souza, C. P., Almeida, B. C., Colwell, R. R., Rivera, I. N. The importance of chitin in the marine environment. *Mar. Biotechnol.* 13(5):823 (2011).

Spetter, C. V., Buzzi, N. S., Fernández, E, Cuadrado, D., Marcovecchio, J. E. Assessment of the physicochemical conditions sediments in a polluted tidal flat colonized by microbial mats in Bahía Blanca Estuary (Argentina). *Mar. Pollut. Bull*. 91:491–505 (2015).

Swiontek-Brzezinska, M., Lalke-Porczyk, E. and Donderski, W. Chitinolytic activity of bacteria and fungi isolated from shrimp exoskeletons. *Oceanol. Hydrobiol*. 36: 101-111 (2007).

Vrba, J., Kofronova-Bobkova, J., Pernthaler, J., Simek, K., Macek, M., Psenner, R. Extracellular, low-affinity b-N-acetylglucosaminidases linked to the dynamics of diatoms and crustaceans in freshwater systems of different trophic degree. *Int. Rev Gesamten Hydrobiol*. 82:277-286 (1997).

Wurzbacher CM, Grossart HP Improved detection and identification of aquatic fungi and chitin in aquatic. *Mycologia* 104(6):126–1271 (2012).

Younes, I, and Rinaudo, M. Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Mar. Drugs* 13(3):1133-1174 (2015).

RECOLECCIÓN Y COMUNICACIÓN DE DATOS AMBIENTALES CON EMPLEO DE SOLUCIONES I.O.T. Y TECNOLOGÍAS LIBRES: ESTACIÓN CHACRAS DE CORIA

Abel O. Serú[a], Regina B. Aguilera[b], Eva M. Maure Russo[b]

[a]*Escuela de Comercio Martín Zapata, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*

e-mail: aseru@mendoza.edu.ar

RESUMEN

La disponibilidad de información meteorológica en tiempo real, así como su comunicación de acceso abierto al público, entrañan una sustancial ventaja para las comunidades y los territorios de su alcance. Asimismo, las innovaciones y tecnologías libres en el campo de la Internet de las cosas (I.O.T.) brindan hoy un repertorio excepcional de prestaciones en cuanto disponibilidad y funcionalidad. Es por ello que, en este escenario, la Facultad de Ciencias Agrarias ubicada en la localidad Chacras de Coria, Mendoza, ha impulsado el desarrollo de un sistema automático para recolección local de datos ambientales, con transmisión en tiempo real y posterior acceso público a datos históricos e información procesada de diversos índices de interés. Se ha empleado para este propósito una estratégica articulación de aplicaciones y tecnologías libres con funciones I.O.T. que como complemento a las tareas de respaldo y cómputo permiten emplear gráficas y notificaciones en diversos sitios web, redes sociales y paneles digitales al alcance de nuestra comunidad; así también esta propuesta ha incursionado en la emisión de alertas preventivas bajo suscripción libre y gratuita. Se destaca en esta iniciativa la oportunidad de propiciar soberanía tecnológica sobre la información que es recabada, así como sobre las prácticas y los saberes al alcance de estudiantes y docentes en el marco de un currículum acorde a las demandas y oportunidades del mercado laboral y el ámbito comunitario. El objetivo de este trabajo es presentar los argumentos, desafíos afrontados, elecciones, así como los resultados obtenidos en el desarrollo, instalación y empleo de este módulo que ha permitido presentar información de relevancia y calidad para nuestra comunidad.

Palabras Clave: Hardware Libre, Arduino, Data Science, Internet Of Things, ESP32

INTRODUCCIÓN

El auge en la adopción de plataformas open source, principalmente orientadas a diversas soluciones de telemetría y prestaciones I.O.T., ha propiciado en la comunidad mundial la oferta de un vasto rango de placas de código abierto capaces de afrontar tareas tales como la publicación de material en línea y el manejo de complejas tareas de *networking* (Singh and Kapoor, 2017). En la agricultura, el uso de plataformas libres permite efectuar tareas de monitoreo a un menor costo (Aguilera et al, 2020). Esto también hace posible que, en el ámbito de las ciencias agropecuarias, docentes y estudiantes sin conocimientos previos de electrónica puedan formarse en competencias técnico-profesionales. Se destaca, ante este escenario de oportunidades, la importancia de identificar, así como fortalecer pilares de una infraestructura de características técnicas

complejas, que a su vez se halle al alcance de las capacidades regionales (Ceballos et al, 2020).

Puede observarse, como ejemplo aún vigente y en contínua evolución, los múltiples modelos existentes en placas de desarrollo con base en el integrado ESP32. El mismo comprende un sistema de bajo costo y energía en una serie de microcontroladores con capacidades *Wifi* y *Bluetooth* y una estructura altamente integrada, potenciada por un microprocesador de doble núcleo Tensilica Xtensa LX6 (Maier et al, 2017). La disponibilidad y accesibilidad de esta tecnología se posibilita, en parte, gracias al avance en la producción de nuevos integrados en formato SoC, del inglés *System on a Chip*; lo cual deviene en menor costo, nuevas funcionalidades y mayor presencia en el mercado. Esto promueve significativamente la investigación, la documentación, generación de antecedentes, casos de éxito y proyectos open source basado en las prestaciones IOT ofrecidas por las soluciones que incorporan el chip ESP32.

Este trabajo abordará cómo se ha logrado la vinculación de una placa ESP32 con múltiples sensores de temperatura, humedad y hoja mojada, observaciones para su programación mediante Arduino IDE, drivers, librerías, antecedentes, métodos y resultados vinculados con esta experiencia en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El sistema automático con prestaciones I.O.T., basado en ESP32 anteriormente descrito, consta de un sensor de temperatura y humedad DHT21 (Fig. 1) que tiene por función la medición de condiciones atmosféricas presentes en la canopia; de igual modo se vinculan al sistema dos sensores de temperatura DS18B20 (Fig. 1) encapsulados para medición de temperatura del suelo en dos niveles de profundidad diferenciados junto a un sensor de hoja mojada y la interfaz correspondiente para su lectura programada en el microcontrolador. El registro de las mediciones es llevado a cabo por una placa de desarrollo de bajo costo, basada en hardware libre, que incorpora el integrado ESP32, el cual opera acorde a la programación subida al mismo desde una PC.

Esto permite el establecimiento estratégico de comunicaciones hacia una plataforma I.O.T. así como el almacenamiento de los datos con la posterior disponibilidad de prestaciones para su graficación, lectura y descarga en formato CSV.



Figura 1. Sensores DHT21 (izquierda) y DS18B20 (derecha).

El circuito integrado ESP32 y su capacidad de cómputo hacen posible el acondicionamiento de señales para la compensación de irregularidades sobre la linealidad en la respuesta de los sensores, así como también permite conversión entre unidades de manera previa a los eventos de subida y registro de los datos en la plataforma. En cuanto al seguimiento de la fecha y hora para estos eventos, ha de realizarse de forma automática en la plataforma I.O.T., añadiéndose oportunamente una marca temporal a dichos datos, de manera previa a su almacenamiento.

El desarrollo está montado en una caja PVC estanca (IP65) la cual proporciona protección para los componentes electrónicos y eléctricos, incluyéndose a su vez en todas las entradas y salidas de conductores el uso de prensacables estancos para dicho fin. En la Figura 2 puede observarse una fotografía interna del sistema adecuadamente conectado donde se puede apreciar la placa controladora ESP32, los sensores y elementos de interfaz con el usuario tales como pulsador, LED de encendido, LED RGB de estado y un display LCD. Este último se ha incluido en las salidas del controlador con fines de señalizar estados referidos al servicio, conectividad y eventos especiales.

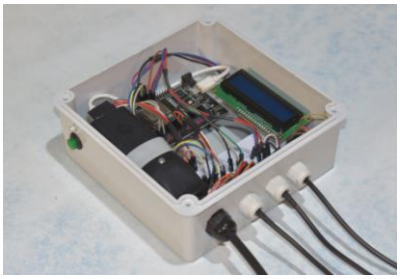


Figura 2. Sistema I.O.T. listo para su sellado y emplazamiento.

Elección de placa controladora y modelo

Se ha optado por una placa integrada ESP32-WROOM-32 Devkit V1.1 que cuenta con 38 pines de los cuales 5 se reservan para fines de alimentación y uno de ellos para *Enable/Reset* del chip. Quedan disponibles de este modo, 32 pines útiles para propósitos de E/S (entrada/salida), sobre los cuales se han conectado los sensores y los periféricos. Se detalla en la Tabla I la totalidad de conexiones efectuadas. La placa debe conectarse, para su programación, a una PC mediante el Driver CP2101; se ha elegido para ello el entorno de programación Arduino IDE.

Tabla I. Detalle del conexionado de sensores, módulos y periféricos sobre la placa ESP32-WROOM-32 Devkit V1.1.

Componente	Tipo de E/S	Pin/es de E/S empleado/s
DHT21	1-Wire	28 (GPIO 17)
DS18B20 (1)	1-Wire	9 (GPIO 25) c/ Pull-Up de 4,7KΩ a 3,3V
DS18B20 (2)	1-Wire	10 (GPIO 26) c/ Pull-Up de 4,7KΩ a 3,3V
Hoja mojada (1)	Ent. Digital	11 (GPIO 27)
Hoja mojada (2)	Ent. Digital	12 (GPIO 14)
Display LCD	I2C	36 (SCL) y 33 (SDA)
LED RGB	Sal. Digital	29 (GPIO5), 30 (GPIO18) y 31 (GPIO19) c/ R=220Ω
Pulsador	Control	2 (RESET)

Conectividad y datalogging

Las prestaciones requeridas para el datalogging son brindadas por la placa ESP32, la cual incluye internamente los recursos de hardware y software para comunicación WiFi en protocolos 802.11b/g/n, actualmente compatibles en enrutadores y repetidores Wi-Fi normalizados para su comercialización en la la República Argentina (Andrade et al, 2008). Esto hace posible la inmediata conectividad, así como un servicio fiable en la gran mayoría de las redes Wi-Fi públicas o privadas donde se ha tenido acceso.

Entre los recursos mencionados, el circuito integrado ESP32 cuenta con un procesador de doble núcleo Xtensa LX6 elaborado con tecnología de 40 nm, que posibilita el control individual de cada uno de ellos hasta una velocidad de 240 MHz acorde al modelo empleado (Babiuch et al, 2019). Otro tipo de conectividad inalámbrica que presenta es la Bluetooth 4.2 en modos “Classic” y “Bluetooth Low Energy” también conocido este último como BLE (Lalib et al., 2021); opciones que convierten a esta plataforma en una robusta y popular propuesta para una amplia variedad de aplicaciones I.O.T. (Singh & Kapoor, 2017). La plataforma se montó sobre una *breakout board* para facilitar la conexión de los sensores y eventual vinculación de más dispositivos con propósitos de ensayo y depuración.

La alimentación del desarrollo se logró mediante una fuente de alimentación de 220V A.C. a 5V D.C. con capacidad de 2A en su salida, ubicada dentro del gabinete estanco, posibilitando el tendido de líneas de alimentación en un mayor rango de alcance desde puntos estratégicos de infraestructura hacia el emplazamiento del sistema.

El sistema se ha emplazado en las cercanías de un puesto de seguridad, el cual cuenta con tomacorrientes de 220V y que a su vez es aledaño a un entorno abierto y apto para las mediciones a desarrollar. Se ha asegurado la disponibilidad de óptima señal Wi-Fi mediante el uso de un repetidor que cumple la función de vincular el ESP32 con una red privada dentro de la Institución.

Plataforma I.O.T. empleada

Se ha escogido ThingSpeak como plataforma I.O.T. de código abierto y con tecnología basada en la nube, que permite recopilar datos provenientes de sistemas embebidos, brindando asimismo herramientas para su almacenamiento, análisis y posterior publicación mediante una API abierta. ThingSpeak cuenta con aplicaciones y extensiones, con funciones de monitoreo, visualización de MATLAB, almacenamiento de datos e integración de los datos del usuario con una variedad de plataformas de terceros (Miry et al, 2020). Para vincular con ThingSpeak el presente desarrollo basado en el chip ESP32, se utilizó la librería “ThingSpeak by MathWorks” (Version 2.0.1) disponible para Arduino IDE, facilitando significativamente la gestión de múltiples tareas y la comunicación directa bajo una *API Key* configurable.

La licencia *Free* de ThingSpeak habilita hasta 4 canales por dispositivo con capacidad de ser actualizados cada un mínimo de 15 segundos. La totalidad de datos se almacena de forma privada en una planilla descargable con formato CSV; al mismo tiempo esta se brinda al público a través de múltiples formatos embebibles y configurables. En la Figura 3 puede apreciarse una vista pública de dicho canal en ThingSpeak.



Figura 3. Vista pública (fragmento) del canal de ThinSpeak.

 ISBN 978-987-1323-91-3

Sensor DHT21 para medir temperatura y humedad del aire en la canopia

Se ha seleccionado, para este propósito, un módulo integrado de bajo costo que incorpora el sensor de temperatura y humedad relativa DHT21, añadiendo al mismo componentes especiales para acondicionamiento de señal y reducción de ruido. Dicho sensor de esta manera hace posible el establecimiento de una comunicación cableada con la placa controladora, a través del protocolo 1-Wire. Esto permite la utilización de un solo puerto de E/S para envío de consultas y para la recepción de datos desde el sensor.

Debido a los requerimientos del sensor DHT21 y del proceso de medición empleado para medir humedad relativa del ambiente, debe asegurarse una adecuada exposición al aire circulante del entorno (Aguilera et al, 2020). Para esta finalidad, se ha contemplado resguardar este sensor empleando un abrigo meteorológico de PVC blanco resistente impreso en 3D.

El módulo sensor DHT21 ha sido vinculado al módulo controlador mediante un cable de audio estéreo de 5m de largo, mallado y apto para las condiciones y factores ambientales del contexto.

Sensores DS18B20 para temperatura del suelo en dos niveles de profundidad

Para realizar las mediciones de temperatura del suelo se seleccionó el sensor DS18B20, particularmente un modelo estanco y de bajo costo, sellado en cápsula de acero inoxidable. Para la conexión se empleó, al igual que con el sensor DHT21, cables de audio estéreo de 2m y 3m de largo (uno por sensor). También se utilizó el protocolo de comunicación 1-Wire anteriormente descrito.

La medición se diseñó para dos profundidades (0,2 m y 1,0 m), requiriendo el uso de dos sensores vinculados a la placa controladora de manera independiente y por lo tanto empleando cada uno de estos puertos de E/S. Se ha escogido particularmente esta disposición y no la conexión en *Bus*, a fin de propiciar una mayor simplicidad del circuito y su programación; favoreciendo la interpretación y diferenciación de las señales durante tareas de prototipado, ensayo y prácticas curriculares.

Sensor de hoja mojada para monitoreo de enfermedades criptogámicas

Se ha dispuesto para dicho fin, un sensor de hoja mojada del fabricante italiano Micros modelo SBF; el cual ha sido vinculado con la placa ESP32 mediante una interfaz de acondicionamiento de señales conectada a dos entradas digitales de la placa. Tanto la calibración, así como la medición mediante este sensor se encuentran actualmente en desarrollo.

Componentes para la interfaz de usuario

Es menester, para una adecuada interpretación de la programación, ensayo, empleo y prácticas curriculares que involucren el sistema en abordaje, que la placa controladora cuente con diversos periféricos de entrada y de salida para fines de control y representación de información de estado, de servicio y mediciones. A continuación, en la Figura 4 se presenta una vista externa del sistema sellado, con su interfaz de usuario.

Se destaca como principales componentes con salida al exterior del gabinete un pulsador estanco de tipo Normal Abierto (NA), así como un diodo LED RGB de 5mm de diámetro. El pulsador tiene por objetivo que el usuario pueda accionar el pin RS (Reset) de la placa ESP32; a la vez que el LED de estado suministra información de acuerdo con la Tabla II.

De igual forma, un módulo display LCD de 16 columnas y 2 filas se ha agregado para representación de información dentro del gabinete; el mismo ha sido destinado a la depuración de mediciones, representación de estados, mediciones, entre otros datos especiales, con el objetivo de lograr un mayor grado de abordaje técnico y pedagógico al momento de incluir este sistema en prácticas curriculares. Este display ha sido conectado a la placa ESP32 mediante dos pines de E/S (SDA y SCL) dado que emplea el protocolo I2C (Patel et al, 2019), lo cual ha optimizado significativamente la disponibilidad de pines y también simplificado su proceso de conexionado y puesta en servicio.



Figura 4. Interfaz de usuario externa, LED y pulsador IP65.

Tabla II. Estados lógicos del LED RGB, con su correspondiente secuencia y color de su señal

Secuencia de señal	Color	Estado
1 (permanente)	Verde	Operativo y conectado a Wi-Fi
1-0 (bucle)	Verde	Operativo sin conexión
1-0 (pulso)	Azul	Subida de datos con éxito
1-0 (pulso)	Rojo	Subida de datos defectuosa
1-0 (bucle)	Rojo	Error de sensores (parada de programa)
1 (permanente)	Rojo	Error de ejecución de ESP32 (parada de programa)

Acondicionamiento del gabinete estanco

Dadas las condiciones operativas y de emplazamiento del sistema ya descritas, ha de requerirse para el gabinete, como mínimo, un grado de protección IP65 que impida entrada de agua y polvo al interior del gabinete; caracterizándose esta protección por resguardar y mantener la integridad de las señales, así como también la integridad física de los sensores y placa controladora; propiciando al mismo tiempo la prolongación de los períodos de mantenimiento (Muñoz, 2021). Se ha escogido para este propósito una caja estanca PVC de marca Tubelectric con medidas 115x115x65 mm y protección IP65. De igual modo tanto prensacables como pulsador deben cumplir con esta misma

norma. El LED de estado se ha ubicado por debajo de la caja en un agujero de salida de 5mm de diámetro y sus bordes han sido sellados, tanto internamente como externamente, con cemento de contacto transparente.

Dentro de este gabinete se ha alojado: fuente de alimentación y su tomacorriente, *breakout boar*d y placa ESP32, *Mini breadboard* para conexiones varias, conductores de entrada y salida, parte interna (rosca) de los prensacables y del pulsador; incluyéndose el display LCD anteriormente mencionado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dispositivo presentado mide y registra en línea exitosamente múltiples variables ambientales y de utilidad para generación de información representable en sitios web, así como en redes sociales, realizando aportes significativos para la toma de decisiones en la actividad agrícola dentro del ámbito local. Las funcionalidades I.O.T. que, de forma inalámbrica, han sido alcanzadas para este trabajo, así como también la visualización de dicha información han mejorado una considerable cantidad de prestaciones en dispositivos anteriormente desarrollados por el equipo de investigación en la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo. Con ello se ha logrado una mejora en el registro de los datos, transformación en información, visualización y comunicación a la comunidad académica y a la matriz productiva local.

Este trabajo permitió además la elaboración de documentación y seguimiento de la trazabilidad en los procesos productivos y de prototipado con el fin de que se incluya esta experiencia en prácticas curriculares de la Facultad de Ciencias Agrarias y su oferta educativa, así como en sus múltiples actividades de extensión.

Se plantea a futuro aplicar mejoras en la comunicación para lugares sin acceso a internet, así como también se espera ampliar las prestaciones del sistema, evaluando y vinculando más sensores y dispositivos.

CONCLUSIONES

La disponibilidad y funcionalidad actual de las tecnologías I.O.T. *open source* de bajo costo, han permitido el desarrollo y puesta en marcha de un dispositivo de medición de variables ambientales para los cultivos en el contexto productivo local. Posibilitando una mejor comprensión del sistema y manejo de la información por parte de la comunidad académica.

Se espera, en próximas etapas estratégicas del desarrollo, la validación de este sistema a través de prácticas de ensayo en laboratorio, así como en periodos representativos de la puesta a campo. Asimismo, se pretende alcanzar el desarrollo de una placa impresa (Printed Circuit Board o P.C.B.) para mayor disponibilidad y robustez de este sistema hacia otros escenarios; estandarizando así el proceso productivo y facilitando aún más su integración en prácticas curriculares aplicables en el ámbito académico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto A063 2022-2024 aprobado y financiado por la Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado de la UNCuyo. Se agradece el apoyo económico del Grupo Avinea S.A.

REFERENCIAS

Aguilera R., Flores Sterba C., Serú A. Monitoreo de variables meteorológicas para la diferenciación del viñedo. Congreso Argentino de Agroinformática (JAIIO). *Anales de CAI* (Congreso Argentino de Agroinformática) 2020 ISSN 2525-0949. 39-45 (2020).

Andrade R., Salas P., Paredes D. Tecnología Wi-Fi. Nuevas Tecnologías N° 5. ISBN 978-987-24110-6-0. 89-98. (2008).

Babiuch M., Foltýnek P., Smutný P. Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing. *In 2019 20th International Carpathian Control* (ICC) (pp. 1-6). CarpathianCC (2019).

Ceballos L. D., Maisonnave M.A., Britto C. R. Soberanía tecnológica digital en Latinoamérica. *Revista Propuestas para el Desarrollo*, aIV, 151-167 (2020).

Labib M., ElGazzar M., Ghalwash A., AbdulKader S. An efficient networking solution for extending and controlling wireless sensor networks using low-energy technologies. *PeerJ] Computer Science* 7:e780 (2021).

Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. *In 2017 Internet Technologies and Applications* (ITA)143-148. IEEE (2017)

Miry, A. H., & Aramice, G. A. Water monitoring and analytic based ThingSpeak. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(4), 3588 (2020) Muñoz M. A.Diseño e implementación de un sistema de adquisición automática de datos en tiempo real con integración a Simatic IT OEE para generar indicadores de productividad para el control de producción en Fábrica de Envases S.A. Fadesa Metal Guayaquil. Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil Ingeniería Electrónica. (92) (2021).

Patel S., Talati P., Gandhi S. Design of I2C Protocol. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science* (IJTIMES). e-ISSN: 2455-2585Volume 5, Issue 03, 741 (2019).

Singh, K. J., and Kapoor, D. S. Create Your Own Internet of Things: A survey of IoT platforms. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(2), 57–68 (2017).

COMPARACIÓN ENTRE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL DE TUCUMAN (26.8°S, 65.1°O) Y LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS ERA5

Cristóbal I. Silvero [ab], Franco D. Medina [ab], Bruno S. Zossi [ab], Gustavo A. Mansilla [ab], Teresita Heredia [ab], Fernando Nollas [c], Ana G. Elias [ab]

[a]*INFINOA (CONICET-UNT), 4000 Tucumán, Argentina*
[b]*Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT), Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, Argentina*
[c]*Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina*

e-mail: cristobalivansilvero@gmail.com.ar

RESUMEN

El estudio de variabilidad de la radiación solar en superficie tiene una importancia clave en el análisis de viabilidad del aprovechamiento de la energía solar en una dada localidad o región, y en el dimensionamiento de la tecnología necesaria para este aprovechamiento. Las bases de datos de reanálisis constituyen una alternativa para evaluar esta radiación en áreas y períodos de tiempo en los cuales no se cuenta con datos medidos. Además de ser abiertos al público, algunas poseen cobertura global y períodos de tiempo continuos relativamente largos lo que las vuelve una muy buena opción para estudiar el recurso solar en una dada región. En este trabajo, siguiendo el análisis de Nollas et al. (2022), se presenta un estudio comparativo entre los datos de radiación solar global medidos en superficie en Tucumán (26.8°S, 65.1°O), durante los años 2017 y 2018 con una frecuencia de minutos, y los obtenidos a partir del ERA5 (ECMWF Re-Analysis version 5), el reanálisis climático más reciente producido por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). La comparación se realizó en escala de tiempo horaria y diaria analizando el acuerdo entre los valores y su variabilidad empleando estadísticos clásicos que se usan comúnmente para este propósito.

Palabras Clave: Radiación solar global, Reanálisis, ERA5, NOA.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad del flujo de radiación solar en superficie, tanto temporal como espacial, es fundamental en el análisis de viabilidad del aprovechamiento de energía solar como fuente de energía renovable en una dada localidad o región, y en el análisis dimensional de la tecnología necesaria para su uso. Este parámetro, que es además una variable esencial en modelos climáticos (Hollmann et al., 2013; Trenberth et al., 2013), se puede obtener a partir de mediciones in-situ, de satélites (a través de imágenes), de modelos o de datos de reanálisis. La última opción es de gran interés, en particular, dada la cobertura espacial y períodos de tiempo continuos relativamente largos de la base de datos (Bosilovich et al., 2013). No obstante, conlleva ciertos problemas derivados de diversas fuentes de error que tienden a generar sesgos sistemáticos, por lo que es necesario verificar los productos de reanálisis con mediciones disponibles antes de utilizarlos en otros estudios o aplicaciones (Zhang et al., 2016). Con este propósito, y siguiendo el análisis de Nollas et al. (2022), se presenta un estudio comparativo entre los datos de radiación solar global medidos en superficie

 ISBN 978-987-1323-91-3

en Tucumán (26.8°S, 65.1°O), durante los años 2017 y 2018 con una frecuencia de minutos, y los obtenidos a partir del ERA5 (ECMWF Re-Analysis version 5), el reanálisis climático más reciente producido por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Hersbach et al., 2020). Al análisis de datos diarios realizado por Nollas et al. (2022), se agrega en este trabajo la comparación en escala de tiempo horaria.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Datos medidos en Tucumán y control de calidad

Los datos, en (W/m^2), medidos en superficie utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos de la red solarimétrica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, y corresponden a la estación de Tucumán, cuyas coordenadas geográficas, el instrumental de medición, datalogger, y período de medición considerado se listan en la Tabla I.

Tabla I. Datos de la estación analizada

Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Sensor	Datalogger	Período
Tucumán	-26.8	-65.1	451	CMP21	CR1000	Marzo 2017-diciembre 2018

La ubicación de la estación meteorológica del SMN se puede observa en la grilla de la Fig. 1, en simultaneo con los puntos mas cercanos de la retícula del ERA5, donde este reanálisis tiene una resolución de latitud-longitud de 0.25°.

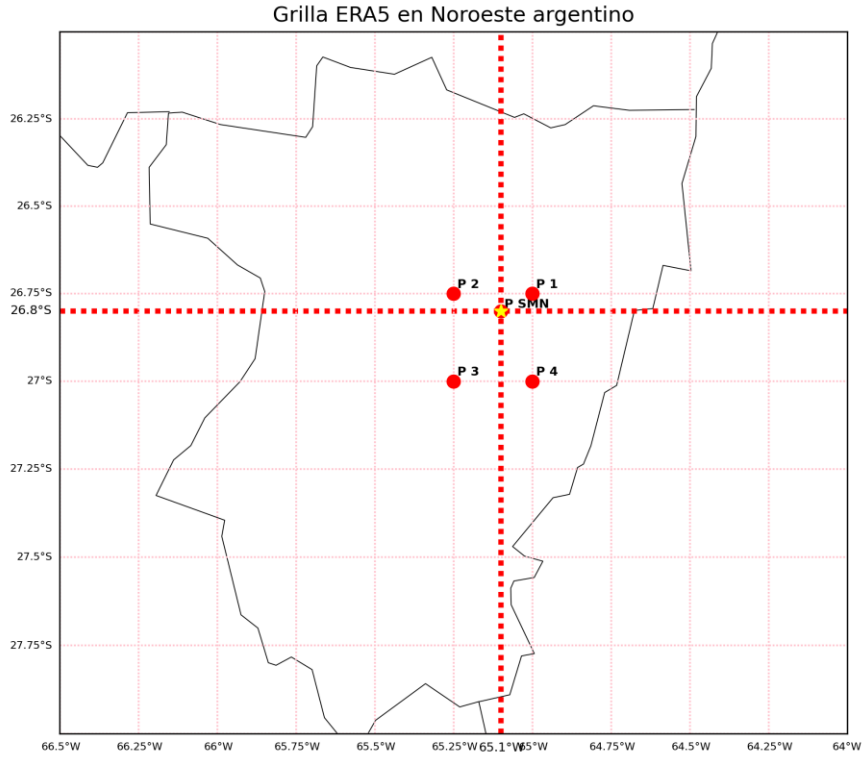


Figura 1. Grilla de ubicaciones de los puntos de referencia**.**

 ISBN 978-987-1323-91-3

Los datos tienen una resolución minutal. La Fig. 2 muestra los datos con procesamiento previo, para el año 2017 (409277 datos) y 2018 (503477 datos) por separado, en función de la hora local que figura en los archivos originales. Se eliminan los valores mayores que 1400 (W/m^2) (porque son representativos de condiciones de nubosidad no considerados en el cálculo de los valores obtenidos en ERA5), y los menores a 0 (W/m^2).

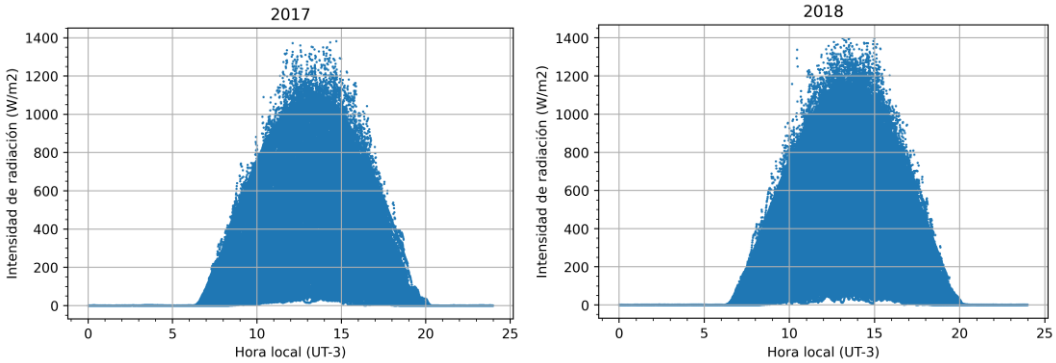


Figura 2. Valores de radiación solar de Tucumán (W/m^2) medidos por minuto en 2017(marzo a diciembre) (panel izquierdo) y 2018(año completo) (panel derecho) en función de la hora local.

Datos obtenidos del reanálisis ERA5

Los datos del ERA5 usados corresponden a la radiación solar en superficie hacia abajo, ssrd (Surface solar radiation downwards), en (J/m^2), valores horarios, en 2017 y 2018. Estos datos están en https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form.

El reanálisis ERA5 cuenta con una base de datos desde 1940 hasta el presente, y combina datos de modelos con observaciones utilizando las leyes de la física. Esto se logra mediante la asimilación de datos, que combina pronósticos anteriores con observaciones recientes para producir una estimación óptima del estado de la atmósfera, llamada análisis, de la cual se emite un pronóstico actualizado y mejorado. ERA5 proporciona estimaciones horarias de numerosas variables atmosféricas, entre las cuales se cuenta ssrd, con una resolución de latitud-longitud regular de 0.25°.

De los 4 puntos de la grilla de ERA5 más cercanos que rodean a la estación del SMN (ver Figura 1), cuyas coordenadas son: 26.75°S, 65.00°O (P1); 26.75°S, 65.25°O (P2); 27.00°S, 65.25°O (P3); 27.00°S, 65.00°O (P4), se seleccionó el punto más cercano, es decir P1.

El ssrd indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra, y comprende las radiaciones directa y difusa. Se considera que en buena aproximación es equivalente al valor modelado de la radiación que mediría un piranómetro. Los datos de ssrd se dividieron en 3600, para pasar de (J/m^2) a (W/m^2), y se pasaron a hora local en Tucumán considerando LT = UT-3, teniendo en cuenta lo indicado por el SMN.

Metodología

Como primer paso para poder comparar los datos medidos en Tucumán con el ERA5, se estimaron los valores promedios horarios en el caso de datos medidos. Para esto se

calculó el promedio horario de los valores entre los minutos 0 y 59 de las horas con cantidad de valores minutales superior al 80%.
En la comparación se consideraron los valores horarios entre las 08:00 y 17:00 (rango horario de mayor radiación en el día) hora local, con lo que los valores para la comparación se reducen a 2842 para 2017, y 3493 para 2018, y entre ambos 6335.
Entre los numerosos estadísticos usados para realizar comparaciones (Gueymard, 2004; Medina et al., 2023), elegimos los tres usados en el trabajo de Nollas et al. (2021): desvío medio relativo (MBD), desvío cuadrático medio relativo (RMSD) y diferencia absoluta media relativa (MAD), a los que agregamos el coeficiente de correlación de Pearson (r) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe, NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency):

$$MBD(\%) = 100\,\frac{\sum y - x}{N\bar{x}}$$

$$RMSD(\%) = 100\frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum(y-x)^2}}{\bar{x}}$$

$$MAD(\%) = 100\,\frac{\sum|y-x|}{N\bar{x}}$$

$$r = \frac{n\,(\Sigma xy) - (\Sigma x)\,(\Sigma y)}{\sqrt{[n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2]\,[n\,\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}}$$

$$NSE = 1 - \frac{\Sigma(x-y)^2}{\Sigma\left(x - \frac{\Sigma x}{n}\right)^2}$$

Donde:

- x: corresponde a los datos del SMN (x)
- y: corresponde a los datos obtenidos del ERA5
- n: es el número de datos de cada serie.

El **MBD** mide el sesgo porcentual promedio de y al sobreestimar o subestimar x, según su signo: positivo o negativo, respectivamente, respecto del valor promedio de x. Su valor óptimo es 0.
El **RMSD** y el **MAD** corresponden a la desviación porcentual del ERA5 con respecto a SMN respecto al valor promedio de x. El valor óptimo es 0, lo que en este caso indicaría que ambas series son idénticas. La diferencia entre ellos está dada por la contribución de los valores de error individuales al resultado final. En el caso del MAD la contribución sigue un comportamiento lineal. Esto significa que un error de 10 contribuye el doble que un error de 5. Por otro lado, en el caso del RMSD los valores muy pequeños (entre 0 y 1) se vuelven aún más pequeños, mientras que los valores más grandes aumentan considerablemente debido a que la suma se realiza sobre el cuadrado de las desviaciones. Esto significa que los errores grandes se magnifican, mientras que los pequeños se pasan por alto.
En el caso de **r** mide el grado de linealidad de la asociación entre x e y, que en nuestro caso serías la seria de radiación del SMN y la obtenida del ERA5, respectivamente. Es decir que mide cuan similar es la variación de x a la de y. Está limitado entre 1 y -1, donde 1 es el valor óptimo en nuestro caso indicando que ambas variables varían de forma idéntica.

El **NSE** determina la magnitud relativa de la "varianza residual" entre ERA5 y SMN (llamada residual por su analogía con el análisis de regresión) en comparación con la varianza de SMN (Nash & Sutcliffe, 1970). Este estadístico varía de -∞ a 1. Un valor negativo corresponde a una mala estimación de la radiación por parte de ERA5 e implica que el valor medio de SMN es un mejor predictor; 0 indica que ERA5 es tan preciso como la media; y 1 (el valor óptimo) implica una coincidencia perfecta entre ERA5 y SMN.

Para hacer el análisis comparativo para estudiar el desempeño de ERA5 en la estación de Tucumán, consideramos los años 2017 y 2018 en conjunto. Se consideraron las series de radiación horaria considerando solo las horas entre 8:00 y 17:00 LT (es decir un intervalo de 10 horas), y las series de radiación diaria sumando la radiación horaria entre las 8:00 y 17:00 LT y considerando solo los días que al menos tenían 7 horas de medición. Resultan así 282 valores diarios en 2017 y 348 en 2018 (630 valores totales entre ambos años). En la Tabla II, se presentan los valores promedio de cada variable (SMN y P1).

Tabla II. Valores promedio de las distintas series analizadas considerando todo el período disponible (horario entre 8:00 y 17:00 LT). Valores horarios en (W/m^2) y valores diarios en (Wh/ m^2).

Valores promedio	**Promedio horario [W/m2]**
SMN	**399.2**
P1	**415.3**
Valores promedio	**Acumulado diario [Wh/m2]**
SMN	**3994**
P1	**4154**

RESULTADOS

En la Tabla III se muestran los resultados de los distintos indicadores estadísticos, para la serie de datos en la comparación horaria. Entre paréntesis se indica el número de valores con el cual se calcularon los indicadores estadísticos.

Tabla III. Resultados de los parámetros estadísticos correspondientes entre los datos horarios del SMN y el punto P1 del ERA5.

Parámetro	**P1(-26.75,-65)**
Serie anual	**2017+2018(6335)**
MBD	**4.02**
MAD	**36.28**
RMSD	**46.64**
r Pearson	**0.79**
NSE	**0.59**

 ISBN 978-987-1323-91-3

En la Tabla IV se muestran los resultados, para la comparación de valores diarios, indicando de igual manera que en la Tabla III, el número de valores considerados, entre paréntesis, luego de la filtración para el cálculo de los estadísticos.

Tabla IV. Resultados de los parámetros estadísticos correspondientes entre los datos diarios del SMN y el punto P1 del ERA5.

Parámetro	P1(-26.75,-65)
Serie anual	2017+2018(630)
MBD	4.01
MAD	15.85
RMSD	22.67
r Pearson	0.9
NSE	0.8

En la Fig. 3 se muestra los diagramas de dispersión entre las series de datos del punto P1 del ERA5 y el SMN para el caso diario y horario para los dos años de estudio.

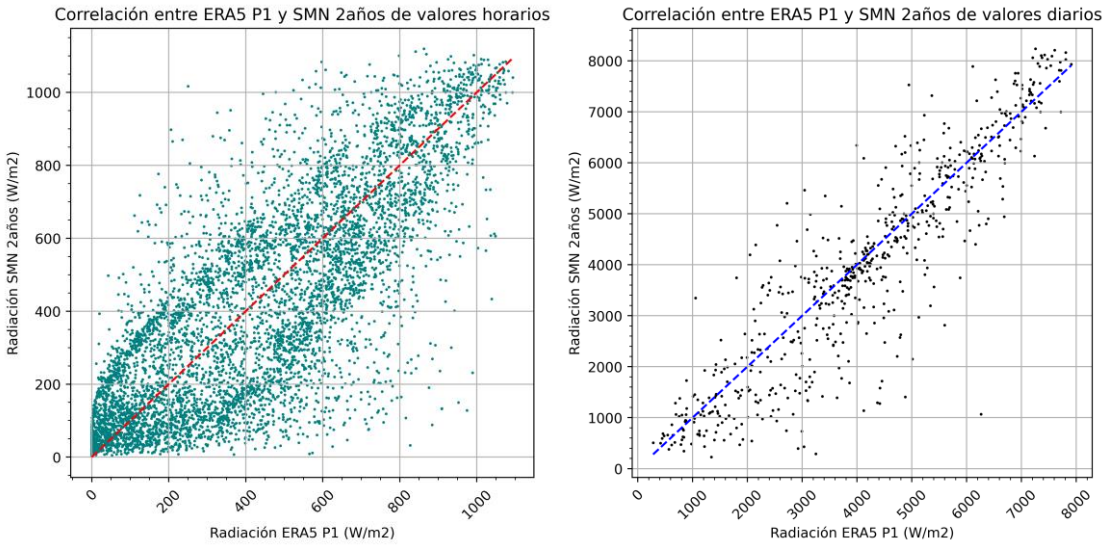


Figura 3. Diagrama de dispersión entre la radiación medida en el SMN y la del punto P1 obtenida del ERA5. Panel izquierdo: valores horarios, panel derecho: valores diarios. Primera bisectriz en línea de trazo (y=x).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El comportamiento de los datos medidos y los provenientes del ERA5 es similar como se deduce de los valores de r de las Tablas III y IV: ~0.8 en el caso de datos horarios y ~ 0.9 en el caso diario. Esto es esperable debido al corto período de tiempo analizado (~2 años) donde la principal variación se debe a la variación diurna y a la estacional, la cual en general, está bien reproducida, tanto en datos de reanálisis como en modelos teóricos de irradiancia.

De acuerdo a los valores de NSE (ver Tablas III y IV), ERA5 es una buena aproximación a la radiación real comparada con el simple valor promedio de los datos medidos. Por otro lado, de acuerdo a los valores de MBD, que en todos los casos es positivo, se deduce que ERA5 sobreestima los valores de radiación, al menos en el período considerado.

En función de los valores obtenidos para RMSD, se observa que el error porcentual es del orden de ~45% en el caso de valores horario y de ~20% en el caso de valores acumulados diarios. De manera que, como es esperable, las integrales diarias de ERA5 presentan una mejor performance que los valores horarios. Con respecto a los valores de MAD, estos hubieran resultado igual a los de RMSD si los errores individuales fueran todos aproximadamente del mismo valor. La diferencia observada en nuestro caso (~10%) indica la presencia de errores grandes.

En un próximo estudio se ampliará el análisis comparativo utilizando otras bases de datos de reanálisis y modelos, se extenderá el período de tiempo analizado, se incorporarán más estaciones en la región y se agregará el análisis de nubosidad. Uno de nuestros propósitos es analizar la incidencia de errores de estimación en el dimensionamiento de dispositivos para el aprovechamiento de energía solar, para determinar, en función de ello, si son o no adecuados para esto los datos de reanálisis.

Agradecimientos

Trabajo enmarcado en el Proyecto de UE del INFINOA: PUE 22920200100008CO.

REFERENCIAS

Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. (2021), The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, PeerJ Computer Science, 7, e623. doi:10.7717/peerj-cs.623

Medina, F.D., Zossi, B.S., Bossolasco, A., Elias, A.G. (2023), Performance of CHIRPS dataset for monthly and annual rainfall-indices in Northern Argentina, Atmospheric Research, 283, 106545. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106545

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

Nollas, F., E. Luccini, P. Orte, M.M. Skansi, G. Carbajal, E. Wolfram, M.M. Poggi, J. Lell (2022), Comparación entre datos de radiación solar de tres bases de datos de reanálisis y mediciones en superficie en Argentina, Libro de resúmenes extendidos del XIV CONGREMET 2022. http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2023/02/LibroActas_compressed.pdf

Willmott, C.J., K. Matsuura (2005), Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, Climate Research, 30, 79–82. doi:10.3354/cr030079.

Gueymard, C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 1024–1034. doi:10.1016/j.rser.2014.07.117

EVALUACIÓN DE DOS DISEÑOS DIFERENTES DE PEQUEÑOS ESPACIOS VERDES. DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT

Susana Stocco[a], M. Alicia Cantón[a], y Erica N. Correa[a]

[a] *Instituta de anbiente habitat y energia, INAHE, Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas CONICET, Mendoza, ARGENTINA.*

e-mail: sstocco@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Las condiciones climáticas de los entornos urbanos son cada vez más críticas debido a la densificación de las ciudades y la pérdida de las áreas vegetadas. Este trabajo tiene por objetivo determinar el potencial de los pequeños espacios verdes "Plazoletas" respecto a cuantificar los beneficios en términos térmicos y de confort que producen en la trama urbana a la cual pertenecen. En este marco se propone un primer análisis de diagnóstico en dos casos de estudio –Plazoleta Ponce y Plazoleta Vergara–. Metodológicamente, se trabajó con la recolección de datos mediante estaciones fijas y móviles. Los puntos monitoreados se localizaron en el interior y el exterior de los espacios verdes. En el interior se identificaron dos esquemas diferentes - arboleda y sellado- y en los exteriores los puntos se ubicaron en los cañones urbanos que bordean las plazoletas a una distancia de 60 metros aproximadamente. También se capturaron imágenes hemisféricas en los siete puntos evaluados que permiten determinar el valor de SVF con el programa RayMan y para el cálculo de confort se utilizó el método COMFA. Los resultados muestran que los pequeños espacios verdes generan impacto positivo en el contexto urbano del cual forman parte. Respecto al periodo de enfriamiento los puntos interiores propician el refrescamiento nocturno ya que disminuyen las temperaturas exteriores entre 2.30ºC y 0.76ºC. Para el periodo de calentamiento el punto arbolado interior al pequeño espacio verde permite atenuar entre 6.64ºC y 1.55ºC las temperaturas máximas. En relación con las condiciones de confort podemos determinar que hay una relación directa temperaturas y condiciones de confort donde el punto arbolado siempre se encuentra en confort térmico durante el periodo monitoreado. En conclusión, la presencia de estructuras arboladas en el diseño de pequeños espacios verdes proporciona efectos positivos en términos térmicos y de confort.

Palabras Clave: Pequeños espacios verdes, Condiciones térmicas, Confort térmico, Configuración de arboleda.

INTRODUCCIÓN

Las áreas urbanas son una forma de transformación del paisaje natural, dado que su impacto no sólo se limita a cambiar la morfología del terreno, su rugosidad, su biodiversidad, etc., sino que también altera las condiciones climáticas y ambientales naturales.

El informe UNOPS (Oficina de las Naciones unidas de servicios para proyectos) sobre infraestructura para la acción por el clima de 2021 determinó que una de cada dos personas vive en ciudades. Se prevé que para el 2050 el 70% de la población mundial viva en áreas urbanas (informe realizado por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas en el año 2014). Este crecimiento continuo de las ciudades aumenta la influencia humana en el medio natural, con consecuencias

ambientales como la degradación de la calidad del aire, la escasez de agua, la acumulación de desechos y altos consumos de energía.

En este contexto, los espacios verdes en sus diversas formas juegan un papel crucial en la promoción de la sostenibilidad urbana y en el fomento del bienestar humano (Sander H.A. and Zhao C., 2015; Heiland et al., 2019). A pesar de la importancia de estos espacios, el desarrollo urbano rápido, generalmente espontaneo y desordenado de las ciudades, ha llevado a una disminución de áreas verdes por habitante. Sin embargo, organizaciones como la OMS apoyan la iniciativa de aumentar la presencia de espacios verdes en entornos urbanos, incluyendo parques, plazas, jardines y pequeños espacios verdes. Proporcionar más espacios verdes urbanos de calidad es un desafío debido a la falta de terrenos libres en las ciudades, el predominio de los intereses inmobiliarios y la falta de planificación (Motazedian et al, 2020). De esta forma es necesarios diseñar espacios verdes que permitan garantizar los beneficios respecto a disminuir las temperaturas exteriores y a propiciar las condiciones de confort térmico de modo garantizar el uso y la permanencia de los usuarios y visitantes (Zhang et al., 2014).

Forman R. T. (2008) define a los espacios verdes como áreas sin pavimentar, permeables y biológicamente activas, que constituyen entornos naturales dentro de una ciudad donde se promueve la conservación de la naturaleza, la agricultura urbana, y también ofrecen espacios para recreación y esparcimiento (Zhang et al, 2021). Muchos estudios respaldan que la presencia de pequeñas áreas verdes en áreas urbanas ayuda a reducir las temperaturas dentro de estos espacios verdes y a influir sobre áreas adyacentes. En el contexto de este trabajo, los espacios verdes de pequeña escala, también conocidos como pequeños espacios verdes, se definen como: espacios urbanos de acceso público, que generalmente están situados en áreas libres o en espacios residuales dentro de la trama urbana, y que surgen a menudo en la intersección de dos tramas urbanas con diferentes ángulos de inclinación o como parte de grandes proyectos inmobiliarios.

La ciudad de Mendoza es un caso especial dentro de las 24 jurisdicciones que conforman la Argentina. Fue fundada a los pies de la Cordillera de los Andes. Se la reconoce como “Ciudad Oasis” (Bormida E., 1984) por transformar su condición natural árida a partir de la inserción de espacios verdes – parques, plazas, plazoletas y arbolado en alineación en su trama urbana. A partir del relevamiento de plazas del Área Metropolitana de Mendoza, realizado por Stocco et al. 2017 se determinó la importancia en porcentajes (%) de cada categoría de espacios verdes, y se concluyó que los parques representan el 93% del área verde de Mendoza, pero solo se repiten un 8% en la trama urbana. Si se toma en cuenta la representatividad de cada categoría de espacio verde en la trama urbana se puede observar que las plazas conforman un 29 %, las plazoletas y pequeños espacios verdes un 40%, mientras que los bulevares y paseos representan un 23%. Las plazoletas y pequeños espacios verdes son la categoría que más aparece en la ciudad de Mendoza. En consecuencia, resulta relevante determinar el potencial microclimático y de habitabilidad que nos permitan identificar y cuantificar si estos pequeños espacios verdes proporcionan un efecto positivo en el contexto urbano al cual pertenecen (ver Fig.1)



Figura 1. a. Ubicación de los casos de estudio en la ciudad de Mendoza. **b.** Gráfico de distribución en porcentajes (%) de las categorías de espacios verdes en Mendoza.

El objetivo de este trabajo es determinar el potencial térmico de los pequeños espacios verdes respecto a su entorno inmediato, con el fin de cuantificar los beneficios que producen respecto a las condiciones térmicas y de confort. En este marco se propone realizar un análisis de diagnóstico en dos casos determinados como representativos en la estructura verde que conforma la ciudad de Mendoza (ver Fig. 1)

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Presentación de los casos de estudio

Para este trabajo se seleccionaron dos casos de estudio representativos en la ciudad de Mendoza localizados en la zona céntrica – residencial. Respecto a su emplazamiento son espacios residuales que surgen de la intersección de dos tramas con diferente orientación.

El primer caso es la plazoleta Ponce, ubicada a 20 minutos del centro de la ciudad de Mendoza, en la denominada 5ta sección. Fue construida en 1931, es de forma triangular y cuenta con 1470 m². Su diseño interno está dado por tres ejes que surgen de los vértices y se unen en un centro sellado que da lugar a una pequeña fuente. Los ingresos están jerarquizados por pérgolas que enmarcan y direccionan los accesos a la plazoleta. La materialidad del espacio está compuesta por: pisos de baldosas calcáreas rojas, superficies de césped, pérgolas metálicas cubiertas con enredaderas, árboles de gran porte y arbustos.

El segundo caso analizado es la plazoleta Vergara, ubicada a 18 minutos del centro de la ciudad de Mendoza, queda emplazada en la 5ta sección a seis cuadras al sur de la plazoleta Ponce. Esta plazoleta fue inaugurada el 11 de setiembre de 1932. Sufrió una serie de remodelaciones, la primera en el año 1947 y la última en el año 2018. Es de forma triangular y cuenta con 1871 m². El diseño general está marcado por un eje central materializado por pérgolas y ejes transversales que permiten el cruce de forma trasversal. Su perímetro está determinado por caminos que se adecuan a su forma triangular. El remate del eje central se da en un espacio circular – sellado encabezado por un arco de acceso. La materialidad sellada está compuesta por baldosones rojos pulidos intercalados con venecitas recuperadas del diseño original y adoquines de piedra. La vegetación está compuesta por superficies de césped, pocas especies arbustivas y árboles de gran porte.

Metodología para el análisis microclimático.

Con el objeto de analizar el comportamiento térmico de los dos casos de estudio y sus entornos se realizaron mediciones fijas de temperatura del aire (Ta) y humedad (HR) con sensores fijos del tipo UX 100. Los sensores se ubicaron en los cañones urbanos a una distancia de 60 metros aproximadamente de cada espacio verde. Los datos fueron adquiridos cada 15 minutos a una altura de 2 metros (Oke, T., 2004), durante un periodo de 30 días en enero de 2023.

Para la evaluación del confort térmico en los pequeños espacios verdes se utilizaron estaciones meteorológicas móviles Hobo, que registran temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, la velocidad del viento, la dirección del viento y la presión atmosférica cada 5 min. Los puntos monitoreados fueron: A- Arboleda conformada por árboles de gran porte, cuyo solapamiento de copas genera áreas de sombra y huecos de tamaños variables. Y punto B- Sellado que representa un área donde predominan las superficies de materiales impermeables, conformando un lugar de encuentro y reunión. (ver Fig. 2). El registro de datos para el análisis de confort se realizó durante el día 25 de enero de 2023.

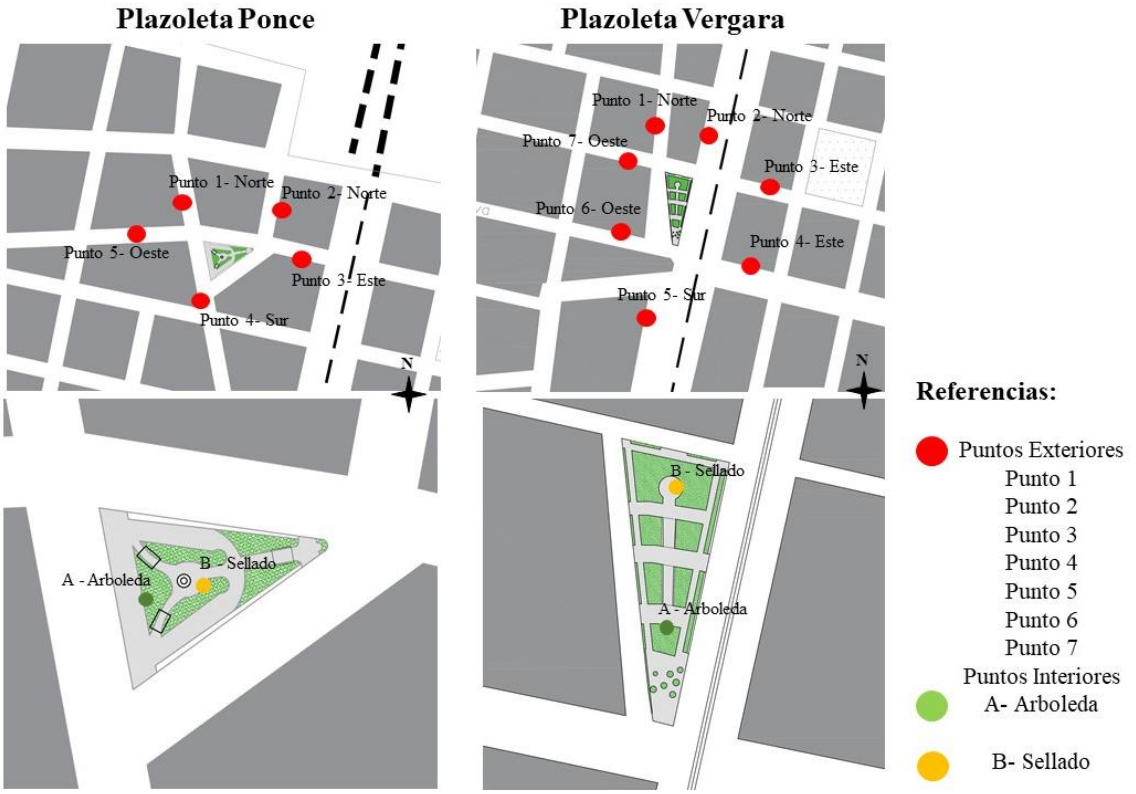


Figura 2. Localización de los puntos de monitoreo Interiores "Arboleda y sellado" y puntos exteriores "Cañones urbanos" para los dos casos de estudio.

Otra variable analizada es el factor de visión de cielo –SVF- que es un parámetro de caracterización espacial utilizado para determinar las condiciones radiativas y la exposición solar en los espacios urbanos. Para calcular el SVF se utilizaron imágenes digitales hemisféricas tomadas en cada uno de los puntos de medición. Las imágenes

fueron tomadas con una cámara digital Nikon Coolpix equipada con una lente de ojo de pez a 1,5 metros de altura del suelo.

Para determinar el SVF se utilizó el programa RayMan que permite procesar las imágenes ojo de pez tomadas en los puntos exteriores e interiores de las plazoletas monitoreadas. (Matzarakis et al, 2010).

Cálculo de confort térmico con el método COMFA.

Para el cálculo del confort térmico se utilizó el método COMFA con SVF que tiene una buena capacidad predictiva para ciudades de clima árido (Ruiz M.A and Correa E. N., 2015). Este método mide el balance energético de una persona en un entorno al aire libre (Brown R. and Gillespie T., 1995). El valor del balance energético, denominado – "S'–, fue calculado a partir de los datos recogidos en cada estructura estudiada y en los dos periodos comparados. Para esta evaluación, se determinó el periodo de 10:00 a 18:00 horas, ya que se considera el más exigente en cuanto a habitabilidad térmica.

$$S = M + R_{\text{abs}} - \text{Conv} - \text{Evap} - \text{TR}_{\text{emitted}} \quad (1)$$

Donde: M, es la energía metabólica utilizada para calentar a una persona; Rabs, la radiación absorbida tanto solar como terrestre; Conv, el calor sensible perdido o ganado por convección; Evap, la pérdida de calor por evaporación; TR emitida, la radiación terrestre emitida. De los resultados obtenidos en -S- se considera que la gente está en confort térmico cuando el balance se acerca a cero. Si el balance supera los 50, las personas ganan energía y se sienten incómodamente calientes. Si el balance es negativo (<50) sienten un frío incómodo. Los datos micrometeorológicos necesarios para calcular COMFA son: Factor de visión de cielo (SVF), temperatura del aire (Ta), punto de rocío (PR), velocidad de viento (Vv), radiación global (RG), radiación difusa (RD) y temperaturas superficiales (TS)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las condiciones radiativas.

La Fig. 3 presenta en forma comparativa los resultados del procesamiento de las imágenes hemisféricas - ojo de pez con el programa RayMan. Se muestran en forma comparativa los valores en porcentaje (%) juntamente con las imágenes en escalas de grises que representan la cobertura de la bóveda celeste y la trayectoria solar.

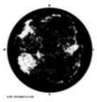
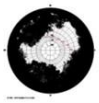
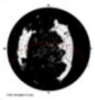
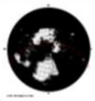
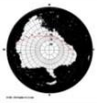
SVF	Plazoleta Ponce								
	Exterior							Interior	
	Punto 1 - Norte	Punto 2 - Norte	Punto 3 - Este	Punto 4 - Sur	Punto 5 - Oeste			A- Arboleda	B- sellado
%	0.15	0.10	0.11	0.42	0.25			0.15	0.52
Imagen									
Plazoleta Vergara									
	Punto 1 - Norte	Punto 2 - Norte	Punto 3 - Este	Punto 4 - Sur	Punto 5 – Oeste	Punto 6 - Oeste	Punto 7 - Oeste	A- Arboleda	B- sellado
%	0.32	0.22	0.11	0.23	0.19	0.21	0.27	0.21	0.62
Imagen									

Figura 3. Se presentan los valores en % del factor de visión de cielo (SVF) y la imagen hemisférica para los diferentes puntos exteriores e interiores de la plazoleta Ponce y Plazoleta Vergara.

Podemos observar que para la plazoleta Ponce los SVF en los cañones urbanos van entre 0.10% para el punto 2 – Norte y 0.42% para el punto 4 – Sur. En el interior del espacio verde el punto A – Arboleda es de 0.15% y el punto B- Sellado es de 0.52%. Se presenta una diferencia de 0.37% entre las dos estructuras internas. En relación SVF interior – exterior podemos detectar que los puntos 2- Norte y A- Arboleda no tienen exposición solar directa. Los puntos 4- Sur y B- Sellado son los que presentan la mayor exposición solar de 6 a 8 horas de sol.

Para la plazoleta Vergara en los cañones urbanos se presentan valores que van de 0.11% para el punto 3 – Este y de 0.32% para el punto 1- Norte. En el interior de la plazoleta el punto A- Arboleda es de 0.21% y el punto B- sellado es de 0.62%. Se da una diferencia de 0.41% entre las dos estructuras interiores. En la relación SVF interior – exterior podemos detectar que los puntos 3- Este, punto 6 - Oeste y punto A - Arboleda captan entre 1 y 3 horas de sol y los puntos 1- Norte, punto 4 - Este, punto 5 – Sur y punto B- Sellado captan de 4 a 6 horas de exposición solar. Esto se debe a que el solapamiento de la copa de los árboles que compone la hemiesfera genera huecos semipermeables que filtra la radiación solar.

Análisis del comportamiento térmico

Este apartado analiza el comportamiento térmico de los puntos exteriores e interiores de las plazoletas Ponce y Vergara. Las curvas de temperatura se construyeron con la selección de un día con características representativas, donde se consideraron dos periodos, el primero “periodo de calentamiento” comprendido entre 8:00 horas y las 19:00 horas, durante el día, donde por acción de la radiación solar comienza a incrementarse progresivamente las temperaturas hasta alcanzar las temperaturas máximas. Y el segundo “periodo de enfriamiento” comprendido entre 20:00 horas y las 7:00 horas, durante la noche. Este periodo tiene lugar después de la puesta del sol, donde comienza a descender las temperaturas hasta alcanzar las temperaturas mínimas.

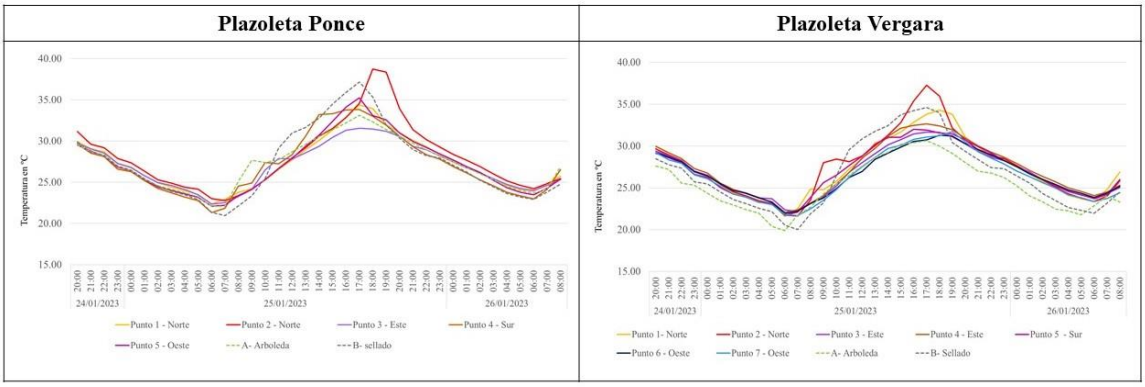


Figura 4. Curvas de comportamiento térmico puntos interiores y exteriores plazoletas Ponce y Vergara.

Análisis plazoleta Ponce

Para el periodo de enfriamiento, podemos determinar que el punto exterior con las temperaturas máximas y mínimas más elevadas es el punto 2 – Norte (SVF- 0.10%, Ta máx. de 31.15ºC y Ta mín. de 22.76ºC) que presenta diferencias respecto al interior del espacio verde de 1.57°C respecto al punto A- arboleda (SVF de 0.15%, Ta máx. de 29.58ºC y Ta mín. de 22.06ºC) y de 1.26°C respecto al punto B- sellado (SVF de 0.52%, Ta máx. de 29.89ºC y Ta mín. de 20.96ºC). El punto exterior que presenta las menores temperaturas mínimas es el punto 4- sur (SVF- 0.42%, Ta máx. de29.64ºC y Ta mín. de 21.33ºC). Este punto genera diferencias de 0.73°C con el punto A- arboleda (SVF de 0.15%, Ta máx. de 29.58ºC y Ta mín. de 22.06ºC) y 0.37°C con el punto B- sellado (SVF de 0.52%, Ta máx. de 29.89ºC y Ta mín. de 20.96ºC).

Estos datos indican que el punto más caliente exterior se encuentra hasta 1.57°C más cálido que el interior del pequeño espacio verde. Respecto al punto más fresco exterior se encuentra igual o hasta 0.73°C más fresco que el interior. Para el periodo de enfriamiento podemos observar que el 80% de los puntos exteriores monitoreados se encuentran más cálidos que el punto A- arboleda – el punto interior más fresco del espacio verde-

Para el periodo de calentamiento podemos observar que el punto que presenta las temperaturas máximas más elevadas es el punto 2- Norte (SVF- 0.10%, Ta máx. de 38.73ºC y Ta mín. de 23.38ºC). Muestra diferencias de 5.61°C respecto del punto A- arboleda (SVF de 0.15%, Ta máx. de 33.12ºC y Ta mín. de 25.13ºC) y 1.56°C respecto al punto B- sellado (SVF de 0.52%, Ta máx. de 37.17ºC y Ta mín. de 22.11ºC). El punto 3 – Este (SVF- 0.11%, Ta máx. de 31.57ºC y Ta mín. de 23.26ºC) presenta las menores temperaturas máximas. Si analizamos el punto 3 – Este respecto a los interiores del espacio verde encontramos diferencias de 1.55°C con el punto A- arboleda y de 5.60°C con el punto B- sellado. Podemos observar que el punto 3 – Este exterior se encuentran más fresco que los puntos interiores del espacio verde. Esto se debe a que presenta un menor SVF respecto a los puntos A- arboleda y B- sellado.

El 90 % de los puntos exteriores analizados están más calientes que el punto A- arboleda entre 5.61°C a 0.72°C. Y respecto al punto interior B- sellado el 80% de los puntos exteriores monitoreados se encuentran más cálidos.

Análisis plazoleta Vergara

Si analizamos el periodo de enfriamiento podemos detectar que el punto que presenta las mayores temperaturas mínimas es el punto 4 – Este (SVF 0.23%, Ta máx. de 30.96ºC y Ta mín. de 24.07ºC). Se observan diferencias de 2.30°C respecto al punto A- arboleda (SVF de 0.21%, Ta máx. de 28.03ºC y Ta mín. de 21.77ºC) y una diferencia de 2.12°C respecto al punto B- sellado (SVF de 0.62%, Ta máx. de 29.38ºC y Ta mín. de 21.95ºC). El punto que presenta las menores temperaturas mínimas es el punto 2- Norte (SVF 0.22%, Ta máx. de 30.76ºC y Ta mín. de 23.33ºC). Presenta diferencias de 1.56ºC respecto al punto A- arboleda (SVF de 0.21%, Ta máx. de 28.03ºC y Ta mín. de 21.77ºC) y de 1.38ºC con el punto B- sellado (SVF de 0.62%, Ta máx. de 29.38ºC y Ta mín. de 21.95ºC).

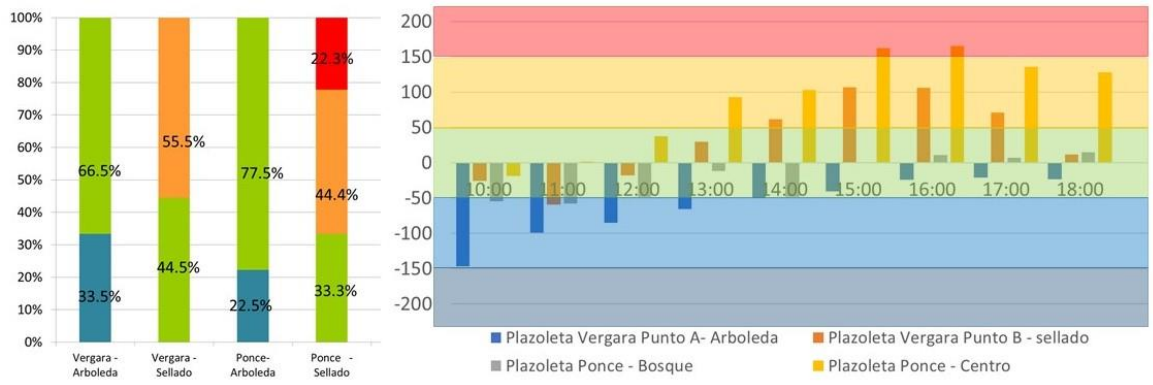
Los resultados obtenidos para el periodo de enfriamiento en la plazoleta Vergara indican que los dos puntos interiores propician el refrescamiento nocturno permitiendo disminuir las temperaturas de su entorno entre 2.30ºC y 1.38ºC.

Respecto al periodo de calentamiento podemos observar que el punto exterior con las temperaturas mas elevadas es el punto 2 norte (SVF 0.22%, Ta máx. de 37.27ºC y Ta mín. de 28.01ºC), presenta diferencias de 6.64ºCrespecto al punto A- arboleda (SVF de 0.21%, Ta máx. de 30.63ºC y Ta mín. de 24.28ºC) y de 2.66ºC con el punto B- sellado (SVF de 0.62%, Ta máx. de 34.61ºC y Ta mín. de 23.21ºC). El punto exterior que presenta las menores temperaturas máximas es el punto 6 – Oeste (SVF 0.21%, Ta máx. de 31.30ºC y Ta mín. de 23.81ºC) las diferencias respecto a los pintos interiores son de 0.67ºC respecto al punto A- arboleda (SVF de 0.21%, Ta máx. de 30.63ºC y Ta mín. de 24.28ºC) y de 3.31ºC respecto al punto B- sellado (SVF de 0.62%, Ta máx. de 34.61ºC y Ta mín. de 23.21ºC) siendo más caliente el punto que se encuentra en el interior del pequeño espacio verde.

Como síntesis del periodo de calentamiento para la plazoleta Vergara podemos observar que las menores temperaturas del aire se dan en el punto A- Arboleda entre 6.64ºC y 0.67ºC.

Análisis de confort térmico en los puntos interiores de las plazoletas

A partir de los datos recopilados con las estaciones móviles se presentan los datos calculados con el método COMFA en los puntos interiores –A- arboleda y B- sellado para los dos casos de análisis Plazoleta Ponce y Plazoleta Vergara.



Referencias figura xx					
	La gente preferiría estar mucho más cálida		La gente preferiría no cambiar de estado		La gente preferiría estar mucho más fresca

 ISBN 978-987-1323-91-3

	La gente preferiría estar más cálida		La gente preferiría estar más fresca	

Figura 5. a. Diagrama de frecuencias. **b.** distribución de confort térmico para las plazoletas Ponce y Vergara.

Si analizamos los datos de confort para la plazoleta Ponce podemos determinar que el punto A- arboleda presenta un 22.5% de las horas evaluadas donde la gente preferiría estar más cálida. Este leve disconfort se da durante las dos primeras horas del periodo de 10 a 11 horas. Respecto al periodo restante un 77.5% de la gente preferiría no cambiar de estado o en confort térmico. Respecto a el punto B- sellado, solo un 33.33% de las horas evaluadas la gente preferiría no cambiar de estado (está en confort térmico), este periodo se da de 10:00 a 12:00 horas. Hay un 44.4% donde la gente preferiría estar más fresca, este porcentaje se registra de 13:00 a 14:00 horas y después se retoma por horas de la tarde de 17:00 a 18:00 horas. Finalmente, el porcentaje restante un 22.3% donde la gente preferiría estar mucho más fresca, se da en los horarios críticos de 15:00 a 17:00 horas (ver Fig. 5).

Si contrastamos los resultados de confort térmico respecto a las temperaturas del aire evaluadas en el interior de los espacios verdes podemos observar que el punto A- arboleda presenta las menores temperaturas del aire máximas y mínimas (Ta máx. 33.12ºC y Ta min. de 22.06ºC) y respecto a el punto B – sellado presenta las mayores temperaturas del aire máximas y mínimas (Ta máx. de 37.17ºC y Ta min. de 20.96ºC). Estos puntos interiores (A- arboleda y B- sellado) generan diferencias de hasta 4.05°C durante el día. Esto se debe a que el punto A- arboleda presenta un de 37% más de condición sombreada que el punto B- sellado.

Según los cálculos de confort térmico para la plazoleta Vergara podemos observar que el punto A- Arboleda presentan un 33.5% de las horas evaluadas donde la gente preferiría estar más cálida, este leve disconfort se registra de 10:00 a 13:00 horas y un 66.5% de las horas evaluadas donde la gente preferiría no cambiar de estado. Respecto al punto B- Sellado a los resultados de confort se presenta un 44.5% de las horas evaluadas donde la gente preferiría no cambiar de estado, este periodo en confort térmico se da de 10:00 a 13:00 horas y un 55.5% donde la gente preferiría estar más fresca, este porcentaje se da de las 14:00 y las 18:00 horas.

Respecto al comportamiento térmico el punto A- Arboleda presenta las menores temperaturas máximas y mínimas (Ta máx. de 31.13ºC y Ta min. de 21.92ºC). Y el punto B – sellado presenta las mayores temperaturas máximas y mínimas (Ta máx. de 34.61ºC y Ta min. de 22.68ºC). Estos datos indican que el punto A- arboleda como el más eficiente en términos de temperatura máxima y mínima. Alcanza a atenuar hasta 3.98°C las temperaturas extremas alcanzadas en el punto B – sellado. Este comportamiento se debe a que el punto A- arboleda tiene un SVF 0.41% más cerrado que el punto B- sellado y no recibe horas de exposición solar directa.

CONCLUSIONES

Los pequeños espacios verdes son indispensables para complementar a la infraestructura verde existente en las ciudades generando una red de espacios vegetados que permiten atenuar las temperaturas extremas. Este trabajo concluye con un primer diagnóstico que permite determinar el potencial térmico que tienen los pequeños espacios verdes respecto

a su entorno urbano y cómo la implementación de arboledas produce condiciones de confort para los usuarios y visitantes.

Desde el punto de vista térmico podemos concluir que para el periodo de enfriamiento los dos puntos interiores (arboleda y sellado) muestran beneficios térmicos propiciando el refrescamiento nocturno en el orden de 1.57ºC para la plazoleta Ponce y de 2.30ºC para la plazoleta Vergara. Para el periodo de calentamiento el punto que proporciona beneficios significativos es el arbolado ya que por su configuración cerrada de SVF 0.15% plazoleta Ponce y 0.21% plazoleta Vergara generan sombra y disminuyen las temperaturas extremas hasta 6.64ºC para la plazoleta Ponce y 5.61ºC para la plazoleta Vergara.

En lo que respecta a las condiciones de confort en los puntos interiores de las plazoletas podemos determinar una relación directa entre temperaturas y confort térmico. En los dos casos de arboleda evaluados, donde la copa de los árboles genera sombras, podemos determinar que predomina la condición de confort térmico a lo largo de todo el periodo. Respecto a los puntos con una condición abierta de SVF, con mayor exposición y materialidad sellada, se encuentran entre 66.7% y 55.5% en disconfort leve o severo.

En conclusión, se puede observar que los pequeños espacios verdes generan diferencias térmicas positivas en términos de temperatura del aire permitiendo el enfriamiento de la ciudad en la noche y atenuando las condiciones extremas en el día. Respecto a las condiciones de confort térmico es imprescindible generar espacios vegetados con árboles de gran porte para propiciar la habitabilidad en los pequeños espacios verdes.

REFERENCIAS

Bórmida, E. 1984 Mendoza, una ciudad oasis. Facultad de Diseño, Arquitectura y Urbanismo. Revista de la Universidad de Mendoza. Edición año 1984, 121 a 137.

Brown, R. y Gillespie, T. 1995 Microclimatic landscape Design: Creating thermal comfort and energy efficiency. John Wiley and Sons, New York, 1995.

Forman, R. T. 2008 Urban Regions. Ecology and Planning Beyond the City. N.Y.: Cambridge University Press.

Heiland, E. G., Welmer, A. K., Wang, R., Santoni, G., Fratiglioni, L., Qiu, C. (2019). Cardiovascular risk factors and the risk of disability in older adults: variation by age and functional status. Journal of the American Medical Directors Association, 20(2), 208-212.

Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H. 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model International Journal of Biometeorology.54, 131–139

Motazedian, A; Coutts, A. M.; Tapper, N. J. 2020 The microclimatic interaction of a small urban park in central Melbourne with its surrounding urban environment during heat events. Urban Forestry & Urban Greening, 52, 126688– .doi: 10.1016/j.ufug.2020.126688

Naciones Unidas, Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020, publicación de las Naciones Unidas emitida por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas.

Oke, T., 2004 Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Iom Report 2004 World Meteorological Organiz, Geneva.

Organización Mundial de la Salud 2017 «Banco Mundial y OMS: la mitad del mundo carece de acceso a servicios de salud esenciales y los gastos en salud abocan aún hoy a la pobreza extrema a 100 millones de personas»,

Peschardt, K. K.; Schipperijn, J.; Stigsdotter, U. K. 2012 Use of Small Public Urban Green Spaces (SPUGS). Urban Forestry & Urban Greening, 11(3), 235–244. doi: 10.1016/j.ufug. 2012.04.002

UNops - PNUMA 2022. Promoción de la acción climatica a través del centro del clima del PNUMA en Copenhague. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. https://www.unops.org/es/news-and-stories/news/advancing-climate-action-through-the-unep-copenhagen-climate-centre

Ruiz, M. A.; Correa, E. N. 2015 Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in forested open spaces in arid zone cities. Theoretical and Applied Climatology, 122(1), 69-83. DOI: 10.1007/s00704-014-1279-8.

Sander, H. A., Zhao, C. 2015. Urban green and blue: Who values what and where? Land Use Policy, Volume 42, Pages 194-209, https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.07.021.

Stocco, S.; Cantón, M. A.; Correa, E. N. 2017 - Espacios verdes en ciudades de zona árida diagnóstico de la situación actual de plazas de la ciudad de Mendoza, Argentina. Cuaderno Urbano Espacio/Cultura/Sociedad. 23- DOI:https://doi.org/10.30972/crn.23232689

Zhang, B.; Xie, G.; Gao, J., Yang, Y. 2014 The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. Building and Environment, 76, 37–43. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.00

Zhao, Q., Sun, X., Xie, F., Chen, B., Wang, L., Hu, L., Dai, Q. (2021). Impact of COVID-19 on psychological wellbeing. International Journal of Clinical and Health Psychology, 21(3), 100252. doi: 10.1016/j.ijchp. 2021.100252

LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA LADERA OCCIDENTAL DE LA SIERRA DEL ACONQUIJA, PROVINCIA DE CATAMARCA

Mario A. Toledo[a], Gloria P. Ibañez Palacios[a], Silvia V. Páez[a] y Paolo F. Saccone[a]

[a]*Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, ARGENTINA.*

e-mail: matoledo@lillo.org.ar

RESUMEN

La vertiente occidental de la Sierra del Aconquija enfrenta una escasez significativa de recursos hídricos superficiales, lo cual tiene un impacto considerable en las economías locales basadas en la subsistencia. Los habitantes de estas tierras dependen exclusivamente de los ríos y arroyos que drenan las cuencas para satisfacer sus necesidades esenciales, como el suministro de agua potable y la higiene, así como para la cría de animales adaptados a las condiciones climáticas y al terreno abrupto de la sierra. Los arroyos tienen su origen en las zonas de mayor altitud, generándose a partir de geoformas criogénicas conocidas como glaciares de escombros, las cuales son comunes en regiones montañosas continentales áridas a semáridas. Los glaciares de escombros, también denominados glaciares rocosos o litoglaciares son indicadores de permafrost de montaña y considerados como reguladores hidrológicos. Además, en la alta cuenca se encuentran geoformas periglaciares asociadas, tales como vegas y lagunas estacionales, que permiten la presencia continua de la biodiversidad en esta región de gran altitud. Asimismo, en el fondo de los valles de altura se encuentran lagunas de origen glaciar, junto con antiguas acumulaciones de morenas que albergan núcleos de hielo. Con el propósito de evaluar la disponibilidad, estado y vulnerabilidad de este sistema hidrológico, se realiza el relevamiento de las geoformas. Se resalta su importancia hidrológica, se efectúa su conteo estadístico y su distribución espacial. El estudio de estas geoformas permitirá comprender y pronosticar el comportamiento del sistema hidrológico en la alta cuenca ante los futuros cambios en el clima.

Palabras Clave: Sierra del Aconquija, Escasez hídrica, Geoformas glaciares y periglaciares, Calentamiento global.

INTRODUCCIÓN

La disminución del recurso hídrico superficial, a causa de las sequias, genera la consecuente pérdida de la capacidad productiva y la calidad de vida de las poblaciones en el Valle del río Santa María. Si a las actuales condiciones ambientales se le suma el creciente proceso de desertización, definido como la degradación de tierras en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas (UNCCD, 1994), esta región podría carecer del recurso hídrico superficial en un futuro cercano.

Estudios llevados a cabo en la cuenca muestran que toda el área se encuentra afectada por procesos de desertificación en diferentes grados. El 40% está afectado por desertificación ligera, el 44% moderada y el 15% severa (Navone et al, 2002). Las principales causas son: eliminación indiscriminada de la cubierta vegetal original que aumenta los riesgos de erosión hídrica y eólica, ausencia de prácticas de conservación del suelo y prácticas incorrectas de irrigación. (Navone et al, 2002).

El avance de la degradación de los suelos y la falta de disponibilidad de agua para riego provocaron una merma del 40% en la productividad de los cultivos (Corso et al, 2011).

Los arroyos presentan caudales bajos e irregulares, en los períodos de sequía y durante los períodos húmedos, ocasionalmente, se presentan fuertes precipitaciones que generan respuestas torrenciales de las cuencas. El excedente de las precipitaciones es regulado solamente por el grado de permeabilidad de los depósitos sedimentarios del cuaternario y la baja permeabilidad secundaria que presenta el sustrato rocoso de las cuencas de aporte. Debido a la escasa o nula vegetación existente, la mayor parte de la precipitación se convierte en escurrimiento superficial, y el desagüe de las cuencas se produce en tiempos reducidos, por la escabrosidad del relieve montañoso y las características morfométricas de las cuencas. El exceso de lluvias que podría ser beneficioso en esta región no es aprovechable, a causa de la torrencialidad de los fenómenos y por el volumen de sedimentos que transportan, afectando negativamente a las actividades humanas y a las obras de captación, conducción y aprovisionamiento.

En condiciones normales la cuenca es alimentada por aguas de lluvias y deshielos. Las fuentes de aprovisionamiento de agua para consumo humano, animal y riego provienen tanto de superficie como de profundidad. Las superficiales se caracterizan por la gran variabilidad estacional en sus caudales. La principal fuente superficial donde se encuentran instaladas numerosas tomas es el río Santa María, que permite el desarrollo agrícola del valle.

Las fuentes de agua subterránea están restringidas a la parte más deprimida del valle, en la llanura de inundación del río Santa María con un ancho aproximado de 4 km (Tineo et al, 2005). Estas fuentes no son accesibles para las poblaciones y parcelas agrícolas ubicadas en las zonas de ladera y piedemonte. Por lo que estos dependen exclusivamente de fuentes superficiales secundarias para cubrir sus necesidades básicas de bebida e higiene, la agricultura y la cría de animales adaptados a las condiciones climáticas y al relieve abrupto del lugar.

Las fuentes superficiales secundarias son obras de captación ubicadas sobre los ríos y arroyos que nacen en la alta cuenca, los principales son: Amapajango, caudal promedio 0,34 m3/seg, Anadalhuala, caudal promedio de 100 l/seg y Pajanguillo, caudal promedio 60 l/seg (Fernández, 2013). La disponibilidad de agua en esta región es lo que hace posible el desarrollo de la agricultura y a la vez limita su expansión (Núñez Aguilar et al, 2004).

Los arroyos que drenan a la ladera occidental de la sierra del Aconquija son fuentes de aprovisionamiento hídrico básico en esta región (Ahumada et al, 2013). Se originan en las áreas cumbrales, a partir de geoformas criogénicas conocidas como glaciares de escombros, considerados como reguladores del recurso hídrico. Estas geoformas alimentan a los arroyos a través del hielo contenido en las mismas y se encuentran ubicadas en sitios de difícil acceso, con elevadas pendientes y posición altitudinal. Se encuentran además geoformas periglaciares, tales como: vegas ubicadas al frente de los glaciares de escombros, y lagunas estacionales que permiten el establecimiento y permanencia de la biodiversidad en este piso geoecológico de altura.

Analizado este contexto y ante un posible escenario de cambio climático en la región, caracterizado por un incremento de las temperaturas con la paulatina disminución de los volúmenes escurridos y almacenados en las fuentes de agua superficiales, las

poblaciones y parcelas de cultivo ubicadas en la zona de piedemonte serán notablemente afectadas por la escasez de agua para consumo.

En ese sentido y con el propósito de evaluar la disponibilidad, estado y vulnerabilidad de este sistema hidrológico se realiza un relevamiento de las geoformas glaciares y periglaciares, las cuales contienen hielo intersticial.

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende a las cuencas afluentes al río Santa María, localizadas en sector SE de la ladera occidental de los nevados de Aconquija, provincia de Catamarca (Fig. 1).

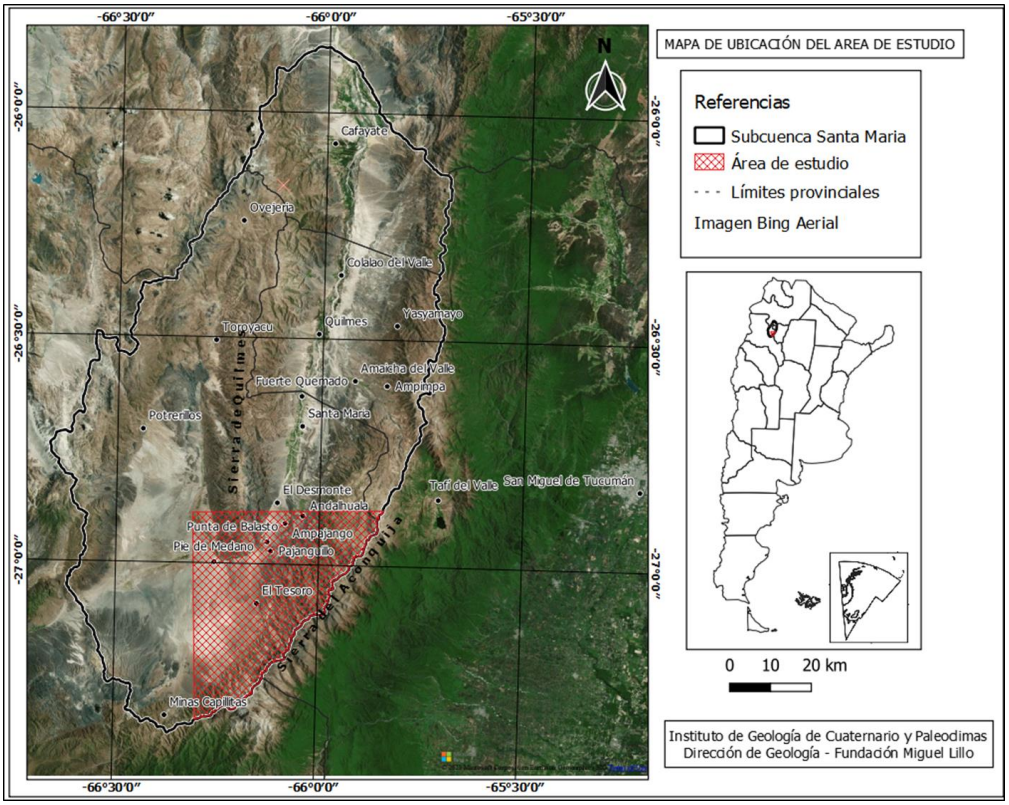


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Se encuentra en el ambiente morfoestructural de Sierras Pampeanas (Caminos, 1979). González Bonorino (1950) describió estas sierras como un sistema de bloques limitados por fallas inversas de alto ángulo, compuesto por un complejo de rocas graníticas y metamórficas de mediano a alto grado de edad precámbrica a paleozoica inferior. En el piedemonte se encuentran afloramientos de rocas terciarias de origen fluvial y lacustre.

El Cuaternario, descripto por Ruiz Huidobro (1965) y Ruiz Huidobro y Sosic (1980) está compuesto de sedimentos aluviales gruesos, formando niveles de acumulación aterrazados o abanicos coalescentes y terrazas fluviales, producto de los sucesivos ciclos de agradación y erosión del Pleistoceno.

La litología de las sierras presenta una cierta permeabilidad secundaria, dada por la presencia de fallas y fracturas. Sin embargo, el escurrimiento superficial predomina sobre la infiltración. Se observó un mayor porcentaje de cauces temporarios. Los

escasos cauces permanentes se manifiestan superficialmente en la zona montañosa y pedemontana, para insumirse en los sedimentos del piedemonte y fondo del valle.

El clima del valle es árido a semiárido, con déficit hídrico permanente y un régimen de precipitaciones estacionales de 200 a 300mm anuales. El mayor porcentaje de lluvias se presenta entre los meses de Octubre y Abril. El déficit hídrico es de aproximadamente 500 mm anuales (Tineo, 2005). 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.

En las cumbres, en función del gradiente térmico regional de 0,55ºC cada 100 m y tomando como referencia la temperatura media anual de 17,1ºC de la estación meteorológica de Tafí del Valle (1976 msnm), la temperatura media anual extrapolada para 4.000 m snm sería de 2,1º C (Ahumada et al, 2013). La toporregión desde los 4.000 hasta los 5.000 m snm o más, corresponde a un clima seco de alta montaña o polar de altura, EB de tipo I de la clasificación de Köppen (1923), equivalente al clima de Tundra, ET de Köppen (1931). En este tipo de clima el suelo está frecuentemente congelado hasta considerables profundidades. La temperatura mínima media de enero se encuentra cercana a 0ºC y la de julio en el orden de los -10ºC, con más de 200 días con heladas al año (Minetti et al, 2005). En la zona cumbral de la sierra de Aconquija las precipitaciones níveas son esporádicas o ausentes en invierno y las precipitaciones de granizo y/o graupel se registran desde diciembre a marzo. No existen mediciones de estos eventos (Ahumada et al, 2013).

En la región se encuentra vegetación arbórea compuesta por algarrobos, churquis, acacias, arcas y chañares, las que se desarrollan principalmente en el valle y piedemonte, no así en las áreas cumbrales donde la vegetación está adaptada a condiciones de sequía y frío de altura.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para lograr los objetivos propuestos se utilizó un Sistema de Información Geográfica SIG, el cual facilitó la gestión de los datos. En el entorno del SIG se procesó la información con el software libre Qgis 3.12.1. La información digital sobre la cual se trabajó se compone de imágenes de satélites Lansat y Sentinel y el Modelo Digital de Elevación SRTM1S28W066V3, resolución: 1 segundo de arco, equivalente a 30 m.

Se procedió a delimitar las cuencas hidrográficas para separar las geoformas de importancia en relación a su contenido hídrico, determinándose la cantidad de geoformas por cuenca, para ello se realizó el procesamiento del MED.

El mapeo de las geoformas se realizó con las herramientas de edición y digitalización sobre las imágenes satelitales. Se usó además el aplicativo Google Earth, para una delimitación precisa de las geoformas mapeadas. Para el cálculo de las áreas y las alturas se utilizó también Qgis 3.12.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área analizada comprende el piedemonte, cuenca media y la cuenca alta del cordón del Aconquija, que ha sido afectado por procesos glaciares y periglaciales, posiblemente durante el Pleistoceno y principios del Holoceno. Las geoformas originadas por estos

procesos se encuentran en las cuencas: Andalhuala, Ampajango, Pajanguillo, Chiflón, Cerrillos, Buey Muerto, El Zarzo, Potrerillos y El Arenal, situadas entre los 26° 56´ 40" y 27° 19´ 30" de latitud Sur.

Partiendo del concepto de que toda cuenca criogénica es un sistema hidrológico complejo en donde los glaciares de escombros son un componente importante (Trombotto y Ahumada, 2005), en la Fig. 2 se muestra la distribución espacial de las geoformas identificadas en el área de estudio que tienen importancia hidrogeológica y su relación espacial con la geología y las parcelas de cultivo y se describen a continuación.

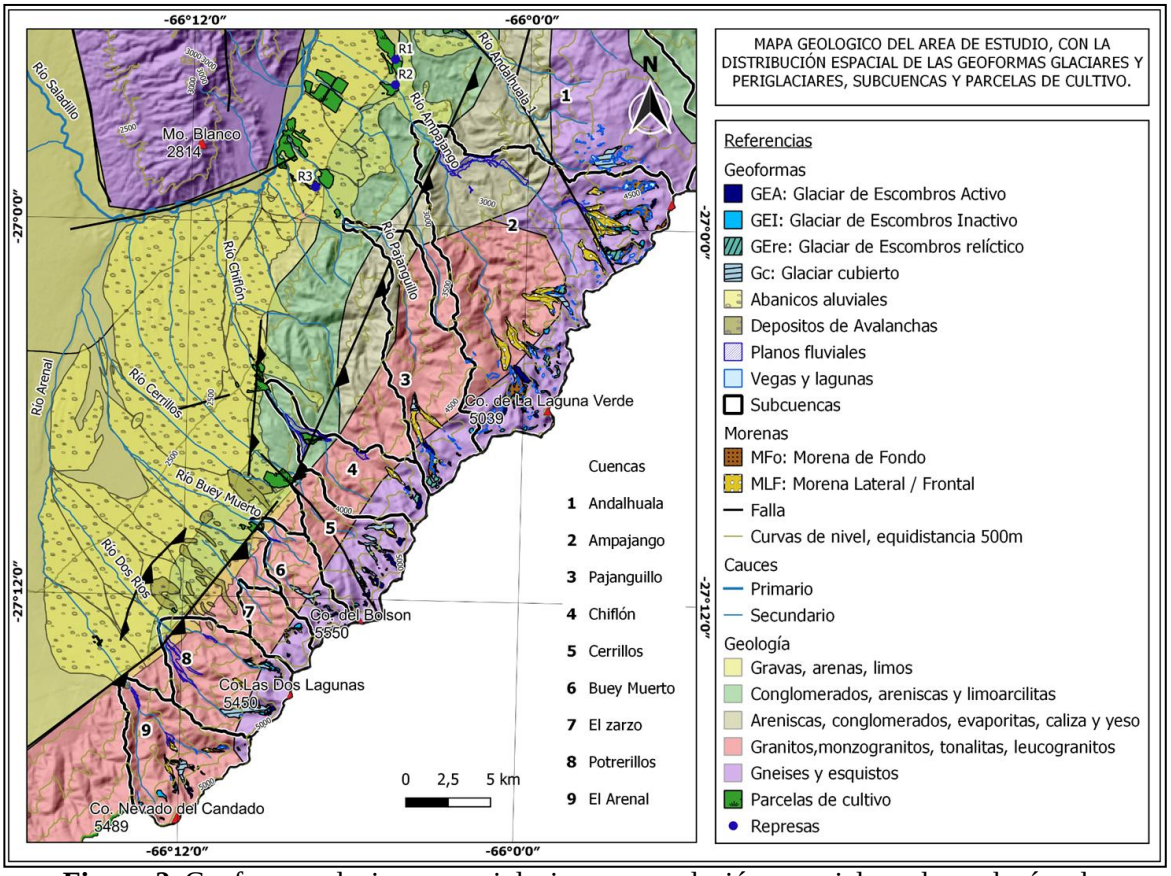


Figura 2. Geoformas glaciares y periglaciares y su relación espacial con la geología y las parcelas de cultivo. Modificado del mapa geológico del SIGAM-SEGEMAR.

Glaciares de escombros

Los glaciares de escombros también denominados glaciares rocosos o litoglaciares, son considerados como reguladores hidrológicos en regiones elevadas, son mesoformas criogénicas de alta montaña constituidas 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). Son indicadores 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). Estas geoformas son consideradas indicadores periglaciares pues representan zonas con temperaturas medias anuales entre -1º y -2ºC y precipitaciones menores a 2.500 mm

(Haeberli, 1983). 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.

Cuando los glaciares de escombros han dejado de moverse, pero aún conservan su contenido de hielo se denominan glaciares de escombros inactivos. Según Brenning (2003), esto puede estar relacionado a causas climáticas, geomorfológicas e hidrológicas.

En las cuencas en estudio se ha definido la existencia de glaciares de escombros activos, inactivos y relícticos en base a su escarpe frontal y morfología superficial. Los glaciares de escombros activos presentan un escarpe frontal muy definido, con pendientes superiores a los 35º. Tomando como referencia a Brenning (2003), una pendiente tan fuerte en materiales no consolidados, solo puede ser preservada a través de la presencia de permafrost. Por el contrario, los glaciares de escombros inactivos presentan escarpe frontal convexo y relieve superficial bastante conservado. Los glaciares de escombros relícticos son aquellas acumulaciones de sedimentos que formaron parte de un glaciar de escombros y que han perdido las características morfológicas propias que los definen como activos o inactivos y por lo tanto se considera que no contienen hielo intersticial.

Glaciares cubiertos

Son glaciares cubiertos de detritos, cuyo hielo se encuentra enterrado por una morena superficial de gran espesor. Esta puede desarrollarse como consecuencia de un gran aporte de detritos, o bien por un balance hidrológico negativo del glacial (Brenning, 2003). La meteorización física por criofragmentación es tan intensa, que el proceso de remoción en masa desde los faldeos de los valles, cubre el hielo del glaciar con fragmentos rocosos de todo tamaño.
En la cuenca Anadalhuala se ha observado una gran cantidad de vertientes procedentes del único glaciar cubierto que contiene esta cuenca y el principal indicador del posible contenido de hielo son las numerosas vegas y humedales que presenta esta cuenca.

Morenas

Morenas laterales y frontales

Las morenas son acumulaciones de sedimentos detríticos depositados por el hielo glacial, también denominado till. Estos sedimentos se caracterizan por su falta de selección, son heterogéneos, heterométricos, poligénicos y sus clastos son angulosos, pueden presentar marcas producidas durante el transporte. Forman montículos, colinas o alineaciones que culminan en una cresta aguda (Strahler, 1981).

Las morenas constituyen una unidad importante como fuentes de aguas, aunque presentan una litología muy heterogénea, tienen una buena permeabilidad. La zona de recarga de estas unidades se encuentra principalmente en las quebradas que bajan de los valles de altura, el agua se insume produciendo humedales.

En las cuencas analizadas, las morenas están constituidas por bloques angulosos y heterométricos distribuidos al azar en una matriz fina. Estas geoformas fueron afectadas

por procesos periglaciales de solifluxión, el cual se caracteriza por el movimiento lento, ladera abajo de materiales saturados descongelados (Trombotto et al, 2014).

Morenas de fondo

Se ubican en el fondo de los valles, principalmente en los valles superiores de la cuenca Ampajango, donde presentan mayor amplitud, se observan además rocas aborregadas. Estas morenas de fondo presentan un relieve en forma de domos y depresiones donde se concentra el escurrimiento superficial y subterráneo dado el deficiente drenaje que caracteriza a este relieve. Estas morenas de fondo pueden ser consideradas como una pradera poco extensa con permanente humedad situada arriba de los 3.800 m snm. Estas planicies almacenan aguas provenientes de precipitaciones pluviales, níveas y deshielo de la capa activa de los glaciares de escombros y de afloramientos superficiales de aguas subterráneas. La Tabla I muestra el número y el área cubierta por las geoformas identificadas.

Tabla I. Número y área cubierta por: GEA (Glaciar de Escombros Activo), GEI (Glaciar de Escombros Inactivo), GEre (Glaciar de Escombros relíctico), Gc (Glaciar Cubierto), MFo (Morena de Fondo) y MLFr (Morena Lateral Frontal).

Cuenca	GEA		GEI		GEre		GC		MFo		MLFr	
	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)
Andalhuala	-	-	-	-	-	-	1	109,77				
Ampajango	11	81,72	43	129,72	11	116,66	3	71,7	5	303,78	13	685,69
Pajanguillo	6	31,71	1	5,98	3	37,5	4	34,69	1	36,88	3	111,89
Chiflón	3	30,6			1	11,51					1	33,17
Cerrillos	23	78,07	9	14,01	3	1,32	8	144,87			4	23,58
Buey Muerto	11	20,63	3	7,01			2	58,73				
El Zarzo	2	1,81	3	9,78			1	2,73			4	16,55
Potrerillos	16	20,3	11	37,26	1	3,36	3	126,35			3	23,19
El Arenal	7	11,9	7	26,45	2		2	57,88			10	74,22
TOTALES	**79**	**276,74**	**77**	**230,21**	**21**	**170,35**	**24**	**606,72**	**6**	**340,66**	**38**	**968,29**

Vegas y lagunas

Se observaron vegas de valles y de pendientes montañosas. Para Roig et al (1985) se encuentran en el piso o nivel altoandino o tundra andina. Las vegas o humedales son zonas en donde el agua es el principal factor que controla el ambiente, así como la vegetación y fauna asociada. Existen en donde la capa freática se encuentra en o cerca de la superficie del terreno o donde el terreno está cubierto por agua.

Se denominan vegas de valles a los humedales que se encuentran en zonas generalmente planas o deprimidas, con drenaje deficiente, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitente. Los vegetales o plantas que habitan el humedal reciben el nombre de vegetales hidrofíticos.

Al cubrirse regularmente de agua, el suelo se satura, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres. Las vegas están controladas por factores locales como ser procesos geomorfológicos que dan origen a freáticas elevadas, sustratos impermeables cercanos a la superficie, endicamientos de cursos de agua, procesos de solifluxión sobre suelos con congelamiento estacional.

Las vegas de pendientes montañosas se originan en las numerosas vertientes que proceden de los materiales de origen glacial con permafrost, con congelamiento estacional y discontinuo. Estas se encuentran sobre los laterales de las morenas que son afectadas por procesos de solifluxión.

Las vegas tienen impresa una fuerte microtopografía caracterizada por montículos y depresiones en forma de cojines o camas formados por un enraizamiento denso de la vegetación. Estos montículos están saturados y poseen hielo intersticial. Estas formas son periglaciales y están vinculadas al crecimiento de los cojines de Oxychloe (Tchilinguirian et al, 2012).

Las lagunas observadas en el área de estudio son generadas por la acumulación del escurrimiento superficial en depresiones generadas como consecuencia de la erosión glacial. El proceso de erosión glacial fue mucho más activo en las cuencas ubicadas hacia el norte, en ellas se observa mayor cantidad de lagunas. Las más importantes se encuentran en la cuenca Ampajango, que en la actualidad son usadas como fuente de abastecimiento de agua potable para las poblaciones de alta montaña. Estas lagunas están sujetas a congelamiento estacional, se formaron a medida que se retiraban los hielos pleistocénicos o en las fluctuaciones acaecidas durante el Holoceno (Ahumada, 2007). La Tabla II muestra el número y área cubierta por las Lagunas Glaciares y las Vegas.

Tabla II. Número y área cubierta por las Lagunas Glaciares y las Vegas.

Cuenca	Lagunas Glaciares		Vegas	
	N°	Area (ha)	N°	Area (ha)
Andalhuala	3	1,2	23	54,63
Ampajango	14	14,14	100	171,71
Pajanguillo	-	-	21	18,53
Chiflón	-	-	6	1,02
Cerrillos	-	-	-	-
Buey Muerto	-	-	-	-
El Zarzo	-	-	-	-
Potrerillos	-	-	2	0,44
El Arenal	-	-	8	5,5
TOTALES	**17**	**15,34**	**160**	**251,83**

DISCUSIÓN

Los cultivos que se desarrollan en la zona de piedemonte reciben riego a partir de canales que se originan en tomas superficiales ubicadas en los ríos Anadalhuala, Ampajango, Pajanguillo, El Tesoro y Cerrillos, situadas en la transición entre el piedemonte y la zona montañosa. Los caudales aportados a las tomas superficiales provienen de cuencas cuya hidrología está fuertemente relacionada a la presencia de permafrost discontinuo con aporte ácueo y níveo estacional.

El permafrost discontinuo detectado a diferentes alturas y condiciones climáticas locales por Ahumada et al (2006) en el NOA presenta condiciones térmicas en desequilibrio con el modelo climático de Haeberli (1985). En dicho modelo, el rango de precipitaciones para la formación de glaciares de escombros sería de 400 a 2.500 mm anuales y el de temperatura promedio anual sería de -15 a -2ºC. Tomando este concepto, y considerando que nuestra región presenta un clima semiárido a árido, con

precipitaciones de 200 mm anuales y temperatura media anual de 4ºC a los 4.600 m snm, los glaciares de escombros se encontrarían en equilibrio inestable.

Teniendo en cuenta lo mencionado, y considerando los posibles escenarios de calentamiento global en el clima regional, los incrementos de las temperaturas producirán el derretimiento del permafrost, liberando gran cantidad de sedimentos a las laderas y a los cauces, ocasionando la pérdida de su capacidad como regulador hidrológico, y la provisión de agua. Los caudales aportados por estas geoformas irán en paulatino crecimiento por el continuo derretimiento del permafrost y luego comenzaran a disminuir al agotarse la fuente reguladora, la entrega hidrológica de la cuenca dependerá de las precipitaciones y del movimiento del agua en los sedimentos.

En la Fig. 3 se observa una imagen Landsat C08 L1TP, RGB: 5,4,3, de fecha 04 de noviembre de 2023, que muestra en color naranja las vegas de altura, y en color negro las lagunas de origen glaciar. También pueden observarse en el piedemonte los oasis de riego, con mayor desarrollo en Andalhuala, Amapajango y Pajanguillo, los cuales se surten del agua de los arroyos de bajan de la sierra (color naranja) y en contraste la extensa superficie de cultivos en la parte superior de la imagen, que se desarrollan en las márgenes del río Santa María (color naranja)

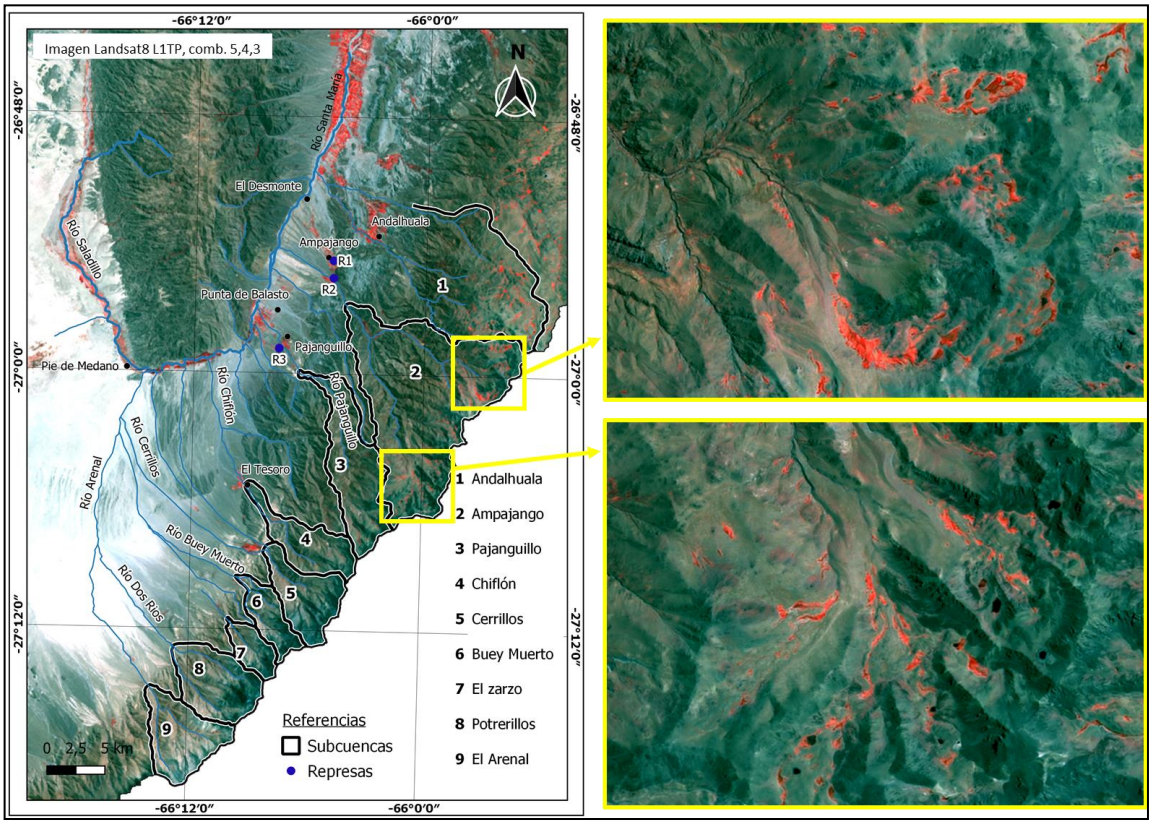


Figura 3. Distribución y relación espacial entre las vegas y lagunas de altura con los oasis de riego del piedemonte y del río Santa María. Imagen Landsat C08 L1TP, RGB: 5,4,3 de fecha 04/11/2023. Fuente: Earth Observing System (EOS) Land Viewer.

Debido a las alteraciones climáticas recientes el crecimiento y formación de humedales o vegas de altura se produce por el incremento de caudales del sistema hidrológico que los alimenta, a expensas del descongelamiento definitivo de los núcleos de hielo de

geoformas vecinas (Ahumada, 2007). Paradójicamente, esta situación es indicadora de degradación del sistema que preserva los humedales de altura, ya que el crecimiento areal es insostenible en el tiempo, por la desaparición de la fuente proveedora de agua (núcleos de hielo) y el aumento de superficie expuesta a evapotranspiración (Ahumada, 2007). Un indicador observado en la zona de estudio es la gran cantidad de vegas y lagunas preponderantemente en las cuencas Andalhuala, y Ampajango, ubicadas al norte del área en estudio y que podría estar indicando la degradación del permafrost. Estas geoformas deben ser censadas anualmente mediante fotografías aéreas e imágenes satelitales, para establecer su grado de alteración según sus valores morfométricos (Ahumada, 2007).

CONCLUSIONES

En la ladera occidental de la Sierra del Aconquija se encuentran geoformas glaciares y periglaciares de importancia hidrológica. Las geoformas glaciares estas representadas por morenas laterales, frontales, glaciares cubiertos y lagunas glaciares. Entre las geoformas periglaciares se encontraron glaciares de escombros activos, inactivos y relícticos, vegas y humedales.

En las cuencas Andalhuala, Ampajango y Pajanguillo se observa el mayor número de vegas, humedales y lagunas, de importancia hidrológica, generadas por la concentración del escurrimiento superficial y subterráneo procedente de las laderas y del descongelamiento de los núcleos de hielo de geoformas vecinas.

El conteo estadístico de los glaciares de escombros en las cuencas analizadas arroja: 79 glaciares activos que cubren un área de 276,74 ha y 77 glaciares inactivos que ocupan un área de 230,21 ha.

Las cuencas de la vertiente occidental de los Nevados del Aconquija presentan un elevado estado de degradación en sus formas periglaciares, principalmente en sus glaciares de escombros. De las 677,3 ha cubiertas por estos cuerpos, 400,56 ha corresponden a glaciares inactivos y relícticos.

Estas geoformas deben ser censadas anualmente mediante fotografías aéreas e imágenes satelitales, para establecer su grado de alteración según su morfometría.

Debe establecerse una red de monitoreo climático en la cuenca para relacionar los caudales de los arroyos con las variaciones en las temperaturas y precipitaciones.

Un calentamiento global en el clima regional afectará a los glaciares de escombros, produciendo: derretimiento del permafrost, liberación de sedimentos, pérdida de la capacidad como regulador hidrológico y provisión de agua.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo con los fondos procedentes del proyecto "*Los glaciares de escombros en el holoceno del NW argentino*. *Implicancias paleoclimáticas y connotaciones en las actividades humanas actuales*". Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo.

REFERENCIAS

Ahumada, A. L., Páez, S. V. e Ibáñez Palacios, G. P. Rock glaciers in the Andean criolithozone at the 27ºS. *Symposium on Climate Change: Organizing the Science for the American Cordillera (CONCORD)*, Mendoza, 51-52 (2006).

Ahumada, A. L. El calentamiento global y sus manifestaciones en la criósfera de las altas montañas del norte argentino. *Boletín Geográfico* 30, 57-69 (2007).

Ahumada, A. L., Páez, S. V. e Ibáñez Palacios, G. P. Los glaciares de escombros en la Sierra de Aconquija, Argentina. *Acta Geológica Lilloana* 25 (1-2), 49-68 (2013).

Arenson, L., Hoelzle, M. and Springman, S. Borehole Deformations Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 13,117-135. Wiley Interscience (2002).

Barsch, D. *Rock glaciers. Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Springer, Berlin (1996).

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 Norte Grande* 30, 7–22 (2003).

Caminos, R. Sierras Pampeanas Noroccidentales de Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan. En: *II Simp. Geología Regional Argentina I. Academia. Nacional de Ciencias. Córdoba*, 225-291 (1979).

Corso, M., Navone, S, Pietragalla, V., Bossio, M. y Maggi, A. Variaciones del proceso de desertificación en la Cuenca del Río Santa María, Catamarca. *Facultad de Agronomía UBA* 31 (3), 213-221 (2011).

Corte A. The hydrological significance of rock glaciers.In: *Journal of Glaciology* 17, 157-158 (1976).

Earth Observing System (EOS) Land Viewer (2018). https://eos.com/

Fernández, E. H. FAO *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Proyecto de Desarrollo Institucional para la Inversión*. UTF/ARG/017/ARG Sistema de Riego de Santa María – Provincia de Catamarca Informe Final, (2013).

Gonzalez Bonorino, F. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista Asociación Geológica Argentina* 5(3) (1950).

Haeberli, W. Permafrost-glacier relationships in the Swiss Alps - today and in the past. *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost* 415-420. Fairbanks Alaska (1983).

Haeberli W. Creep of moutain permafrost; internal structure and flow of alpine rock glaciers. In: Mitteilungen der VersuchsanstaltfürWasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETHZurich, 77, 142 p. (1985).

Köppen, W. *Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde*. Berlin und Leipzig, 369 (1923).

Köppen, W. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruter Co. XII. Berlin und Leipzig, 388 (1931).

Minetti, J. L., Acuña, L. R. y Nieva, J. I. El régimen pluviométrico del Noroeste Argentino. En Minetti, J. L. (ed.), *El clima del Noroeste Argentino*. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C: Zon Caldenius 169-186 (2005).

Navone, S., Espoz-Alsina, C., Maggi, A.E. e Introcaso, R. Monitoreo de la desertificación en los valles semiáridos del noroeste argentino: Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica empleando indicadores biofísicos y socieconómicos. *Revista de Teledetección* 18, 5-19 (2002).

Núñez Aguilar F.A. y Álvarez de Toledo J.M. *El riego en la provincia de Catamarca*. Informe Banco Mundial, 93pag. (2004).

Qgis 3.12.1 with Grass (2020), Sistema de información geográfica de código libre: https://download.qgis.org/downloads/.

Roig, F. A., J. Anchorena, O. Dollenz, A. M. Faggi y Méndez, E. Las comunidades vegetales de la transecta botánica de la Patagonia Austral. Primera parte: la vegetación de área continental. En: Boelcke, O., D. M. Moore, & F. A. Roig (eds.), *Transecta botánica de la Patagonia Austral*. Buenos Aires: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina), Instituto de la Patagonia (Chile), Royal Society, Gran Bretaña (1985).

Ruíz Huidobro, O.J. Hidrogeología del valle de Santa María, provincia de Catamarca, Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina*20 (1), 29-66, Buenos Aires (1965).

Ruiz Huidobro, O. J. y Sosic M. V. Aguas subterráneas. En: *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba. 1641-1691(1980).

SIGAM (Sistema de Información Geológica Ambiental Minera), del Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR (2016). https://sigam.segemar.gov.ar/geonetwork39/srv/spa/catalog.search#/home

SRTM1S28W066V3, *Shuttle Radar Topography Misión* (2014). https://earthexplorer.usgs.gov/.

Strahler, A. N. y Strahler, A. H. *Geografía física*. Omega, Barcelona, España (1981).

Tchilinguirian, P. y Olivera, D. E. Degradación y formación de vegas puneñas (900-150 años AP), Puna Austral (26ºS) ¿Respuesta del paisaje al clima o al hombre?. *Acta Geológica Lilloana* 24 (1-2), 41-61 (2012).

Tineo, A. Hidrogeología del Valle de Santa María entre Punta de Balasto y Prov. de Tucumán. *INSUGEO, Serie de Correlación Geológica* 20 (2005).

Trombotto, D. y Ahumada A. L. Los Fenómenos periglaciales. Identificación, determinación y aplicación. *Ópera Lilloana* 45, 131p (2005).

Trombotto Liaudat, D., Wainstein P. y Arenson, L. U. *Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana / Terminological Guide of the South American Geocryology*. Vázquez Mazzini Editores, 128 páginas, Buenos Aires (2014).

UNCCD. United Nations Convention to Combat Desertification, Intergovernmental Negotiating Committee For e Convention to Combat Desertification, Elaboration of an International Convention to Combat Desertificaction in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. U.N. Doc A/AC 241/27, 33 I.L.M. 1328. United Nations, USA. (1994).

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO Y ANDESITA SOMETIDAS A COMPRESIÓN UNIAXIAL

Alejandra Vesga-Ramírez [ab], Dino Filipussi [ad], Emilio Camilión [e], Martín Gómez [ab]

[a] *Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA*
[b] *Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[c] *Departamento de Física, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*
[d] *YPF-Tecnología, ARGENTINA*

e-mail: alejandravesga@cnea.gov.ar

RESUMEN

Investigar las características de fractura de las rocas en variadas condiciones de esfuerzo es crucial para comprender los mecanismos de fractura y realizar predicciones de posibles fallos en rocas sometidas a compresión. La Emisión Acústica (EA) es un método de ensayo no destructivo (END) que se utiliza para estudiar las ondas acústicas generadas cuando un material está bajo solicitación, siendo una herramienta esencial para discernir discontinuidades en el material y establecer áreas propensas a inestabilidades, como la activación y/o reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. En este estudio se presentan resultados obtenidos de las señales de EA durante un ensayo de compresión uniaxial realizado en rocas del tipo Basalto y Andesita, originarias de los Andes en Argentina. Las rocas fueron sometidas a diversos estados de tensión hasta alcanzar el punto de rotura, permitiendo así el análisis de los factores que influyen en los parámetros de EA registrados para ambos tipos de roca. Se exploraron las características de las señales de EA en distintas etapas de carga, evaluando la variación de la tasa de conteo de eventos AE y la tasa de energía bajo diferentes métodos de carga. Además, se examinaron los eventos de EA a través de parámetros característicos primarios y secundarios tales como la relación FM/RA, con el objetivo de clasificar los modos de fractura y resaltar las situaciones en las que predominan los modos de tensión o corte a lo largo del ensayo.

Palabras Clave: Emisión Acústica, Basalto, Andesita, Argentina, Fractura Ténsil, Fractura Corte

INTRODUCCIÓN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno que se produce cuando un material libera energía en forma de ondas elásticas en respuesta a una solicitación externa (Zhang 2021, Ou, 2024). Estas ondas, generadas por una fuente de EA, suelen asociarse con la propagación de microfisuras, el reacomodo de granos o rupturas estructurales. El monitoreo de las ondas de EA constituye una técnica de Ensayos No Destructivos (END) que permite observar los procesos de fractura interna en materiales geológicos y de uso industrial (Calabrese, 2020). Las señales de EA contienen información crucial sobre la

evolución del daño, lo que facilita la identificación de los mecanismos de fractura y la cuantificación de la severidad de los procesos que pueden conducir al colapso estructural.

En estudios geomecánicos, el análisis de EA se ha consolidado como una herramienta fundamental para comprender el comportamiento de las rocas bajo esfuerzos compresivos (Ullah. 2023, Xu, 2024; Ou, 2024). Durante los ensayos de compresión uniaxial, las rocas experimentan una combinación de tensiones internas que pueden conducir a diferentes tipos de fracturas: tensiles, de cizallamiento (corte) o mixtas (Ou, 2024). Comprender estas fallas es crítico para aplicaciones en minería, construcción subterránea, y monitoreo de estabilidad en taludes, donde la identificación temprana de fracturas permite prevenir colapsos y mejorar la eficiencia operativa (Liu,2022, Qin, 2024).

El presente estudio realiza una comparación detallada del comportamiento de dos tipos de roca volcánica – Basalto y Andesita – sometidos a compresión uniaxial. Estas rocas, ampliamente utilizadas en aplicaciones de ingeniería y geología, presentan diferencias en sus propiedades mecánicas y estructuras internas. El Basalto es conocido por su alta densidad y relativa fragilidad, mientras que la Andesita, al ser menos densa, puede exhibir mayor capacidad de deformación antes de fracturarse. A través del monitoreo con EA, este trabajo busca evaluar las etapas de microfisuración y fractura, identificar los modos predominantes de falla y extraer patrones que puedan ser utilizados para predecir el comportamiento de estos materiales en condiciones críticas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Principio de detección de Emisión Acústica

Para detectar la EA, se utilizan sensores o transductores que se colocan en la superficie del material que se va a inspeccionar. Estos dispositivos están diseñados para capturar las ondas sonoras generadas por el material durante su funcionamiento normal o cuando se somete a cargas o cambios en su estado. Estas ondas son convertidas en señal eléctrica por el sensor, y amplificadas por el preamplificador, llegando a una computadora que las procesará y registrará, ver Fig. 1.

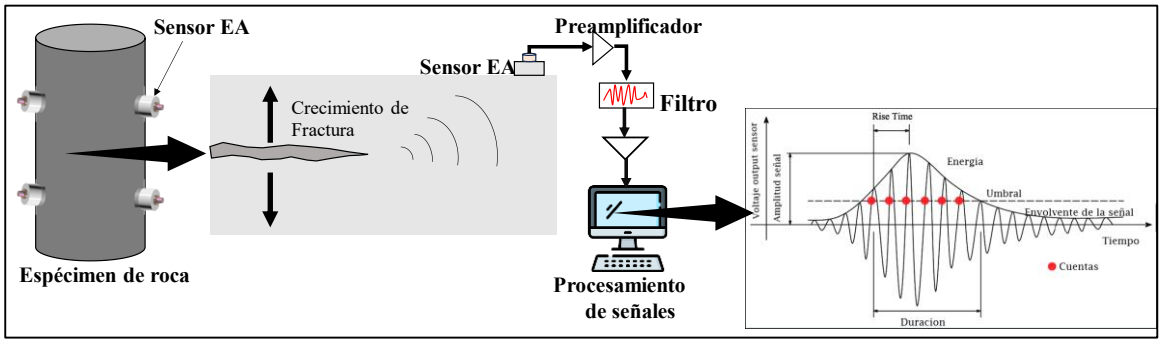


Figura 1. Principio de detección de EA y parámetros típicos de la señal de EA recibida**.**

Entre los parámetros extraídos se encuentran la Amplitud, que indica la magnitud máxima alcanzada por la señal de EA, el Rise Time, que describe la rapidez con la que se alcanza la amplitud máxima desde el inicio del evento, y la frecuencia media (FM), que representa el valor promedio de la frecuencia de las ondas acústicas generadas durante el

evento. Así mismo se registra la duración del evento, que indica el intervalo de tiempo durante el cual se detectaron la EA, la energía total liberada, cuentas, entre otros.

Clasificación de modos de fractura a partir de EA

La clasificación de los eventos de EA desempeña un papel crucial en el análisis de fracturas en rocas. Una técnica comúnmente utilizada para clasificar estos eventos se basa en el gráfico FM vs RA (Jiao,2019; Wang, 2021, Ou,2024)

El gráfico FM vs RA es una representación visual que permite evaluar y distinguir diferentes modos de fractura en los eventos de EA. FM a la frecuencia media, RA (Ratio Amplitude por sus siglas en inglés) es una medida que compara las amplitudes de las ondas compresionales y de corte presentes en el evento, ver Fig. 2.

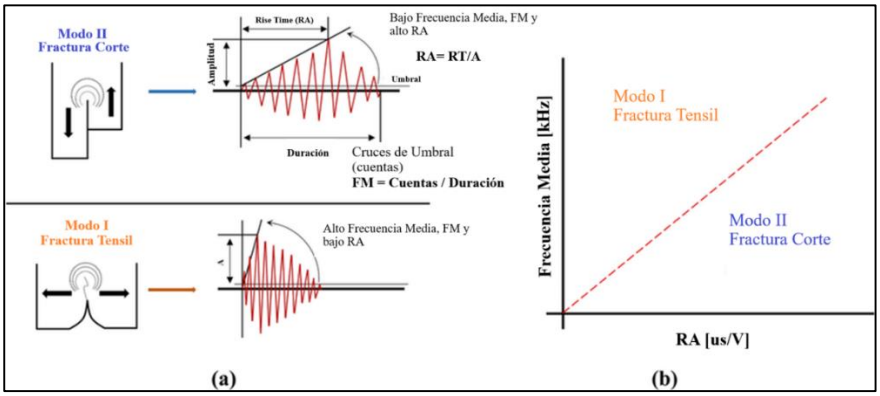


Figura 2. Diagrama esquemático del gráfico de Frecuencia Media (FM) vs RA para discriminar la fractura tipo Tensil y Corte.

En este gráfico, los eventos de EA se representan como puntos, donde el eje FM representa la relación entre las amplitudes de las ondas compresionales y de corte, mientras que el eje RA indica la amplitud total del evento. Al interpretar la posición de los puntos en el gráfico, es posible clasificar los eventos en diferentes categorías de fractura.

El parámetro Frecuencia Media (FM) se obtiene a partir del cociente entre los parámetros Cuentas/Duración.

$$FM = \frac{Cuentas}{Duración} = unidades\ en\ kHz$$

El parámetro RA se obtiene a partir del cociente entre los parámetros RiseTime/Amplitud

$$RA = \frac{RiseTime\ [us]}{Amplitud\ [V]} = unidades\ en\ us/V$$

Por ejemplo, los eventos ubicados en una región cercana al origen del gráfico, con una relación FM baja y una amplitud total RA relativamente alta, suelen corresponder a eventos de fractura de tipo tensión. Por otro lado, los eventos situados en una región con una relación FM alta y una amplitud total RA moderada, suelen asociarse con eventos de fractura de tipo corte (Li,2022, Ullah,2023).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se llevaron a cabo ensayos de compresión uniaxial en rocas de Basalto y Andesita, originarias de los Andes en Argentina. Estos ensayos tuvieron como objetivo evaluar la respuesta mecánica de ambos materiales y monitorear la evolución de las microfisuras a través de la Emisión Acústica (EA). Para la aplicación de carga, se utilizó una máquina de compresión con una capacidad máxima de 40 toneladas fuerza, permitiendo el control preciso de los esfuerzos aplicados sobre cada muestra. Cada muestra fue sometida a compresión uniaxial con una tasa constante de deformación de $\frac{3\times10^{-4}}{s}$. La carga, controlada por desplazamiento, se aplicó en etapas de aumento lineal y otras de carga constante en función del tiempo hasta alcanzar la fractura completa.

Las muestras de Basalto fueron extraídas del volcán Peteroa, mientras que las de Andesita provienen del Cerro Blanco en Argentina, ver Fig 3. Debido a las diferencias naturales en la estructura y composición de estas rocas, las dimensiones de las muestras se ajustaron para asegurar una adecuada comparación: Basalto: 54 mm de diámetro y 150 mm de largo, Andesita: 37.49 mm de diámetro y 82.32 mm de largo. Cada probeta fue preparada cuidadosamente para garantizar superficies uniformes y evitar irregularidades que pudieran afectar los resultados. Las muestras fueron almacenadas en condiciones controladas antes de los ensayos para evitar la alteración de sus propiedades físicas

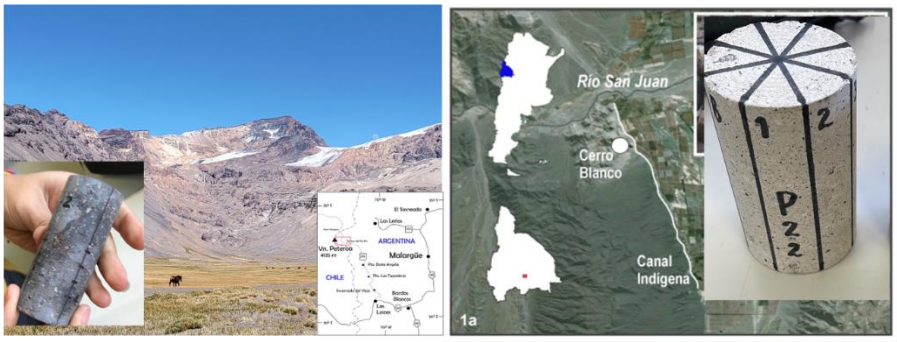


Figura 3. Rocas extraídas del volcán Peteroa (tipo Basalto) y Cerro Blanco (tipo Andesita) en Argentina

Adquisición de Datos de EA

Cada muestra fue sometida a compresión uniaxial con una tasa constante de deformación de $\frac{3\times10^{-4}}{s}$, avanzando en 6 etapas hasta alcanzar la fractura completa. Durante el ensayo, se registraron las señales de EA en tiempo real mediante un sistema de adquisición de datos conectado a sensores acoplados a las superficies de las muestras. Estos sensores detectaron las ondas elásticas generadas por las microfisuras y fracturas internas que se produjeron bajo carga.

Los datos de EA registrados en este trabajo fueron adquiridos con un equipo de EA marca PAC de dos canales (uno banda ancha y otro sintonizado a 150 kHz) y se midieron los parámetros de EA durante la carga. Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40 dB, filtradas por un filtro pasa bajo de 20 kHz y un filtro pasa alto de 1MHz. Una frecuencia de 2000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 42 dB basado en el ruido ambiental. Los parámetros de la señal

digital y los datos se almacenaron continuamente en el buffer y luego se transmitieron al ordenador para su posterior procesamiento.

Para garantizar la calidad y relevancia de las señales de EA registradas, se aplicaron varios filtros. Inicialmente, se seleccionaron señales con una energía superior a 10 unidades, una amplitud máxima mayor a 50 dB y un tiempo de subida (Rise Time) inferior a 300 µs. Posteriormente, se realizó una reparametrización elevando el umbral a 55 dB y estableciendo un tiempo de discriminación (HDT) de 100 µs. Estos criterios permitieron eliminar señales espurias o irrelevantes, optimizando el conjunto de datos y reduciendo significativamente la carga de procesamiento.

RESULTADOS

En el ensayo con Basalto, se registraron 66,861 señales de EA, las cuales se redujeron a 9713 tras aplicar el filtrado entre el sensor 1 y el sensor 2. La fractura final ocurrió a una carga de 118 kN, después de 1,595 segundos de ensayo (ver Fig 4a y 4b). Por otro lado, la Andesita registro 92,786 señales durante el ensayo, reducidas a 10916 tras el filtrado entre ambos sensores. La fractura máxima se alcanzó con una carga de 266 kN, después de 1,493 segundos (ver Fig 4c y 4d).

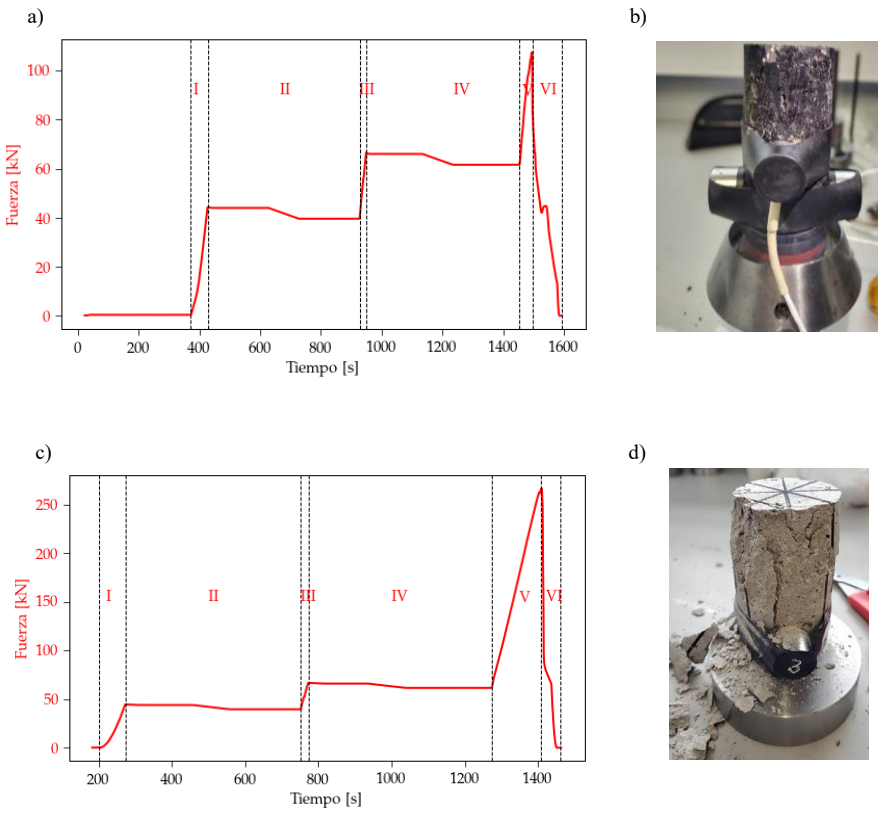


Figura 4. Curvas de carga en función del tiempo y estado final de las muestras para los ensayos de compresión uniaxial en Basalto (a y b) y Andesita (c yd).

Análisis de los Parámetros de EA

A continuación, se presenta el análisis de post-procesamiento en estas señales de EA para investigar los parámetros más representativos. Estos parámetros fueron seleccionados debido a su capacidad para mostrar variabilidad a medida que la roca se acerca a la etapa de rotura durante el ensayo. Estos resultados se replican consistentemente para todas las muestras analizadas y medidas en ambos canales.

Amplitud

Este parámetro se refiere al valor máximo valor de amplitud de la señal de EA para cada hit. Se representa en dB. En la Fig. 5 se observan las amplitudes registradas en el sensor 1 para cada evento de EA detectado en el ensayo de Basalto y Andesita. El momento de la rotura de la probeta o de la propagación inestable de la fisura se da en coincidencia con la máxima carga aplicada. Al superponer en el gráfico de la curva de aplicación de la Fuerza sobre la probeta se observa cómo el valor de la amplitud de los hits de EA va aumentando correlacionado con el aumento de la fuerza, y así mismo se observa como disminuye la cantidad de hits registrados de EA cuando la fuerza se mantiene constante, ver Fig. 6.

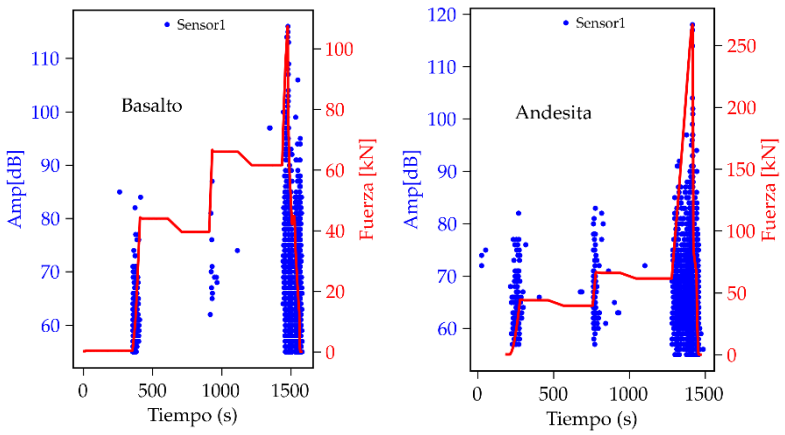


Figura 5. Fuerza aplicada sobre la roca (línea roja) y amplitud de los hits de EA (marcador azul y rojo) registrados en el ensayo en función del tiempo. A la izquierda para Basalto y a la derecha para Andesita.

Hits acumulados vs Tiempo

El tiempo de ocurrencia (‘hit time’) se refiere al tiempo en el cual se considera que comienza un evento de EA. Esto ocurre cuando la señal de cada hit supera por primera vez el umbral. En la Fig. 6 se muestran los hits acumulados (la suma acumulada de los hits a lo largo del tiempo) de las dos muestras de roca. La gráfica muestra que el Andesita presenta un aumento más progresivo en los hits de EA, con múltiples incrementos intermedios antes de la fractura, sugiriendo una propagación gradual de microfracturas. En cambio, la Basalto acumula la mayoría de los eventos cerca del punto de falla, indicando un comportamiento más súbito y catastrófico.

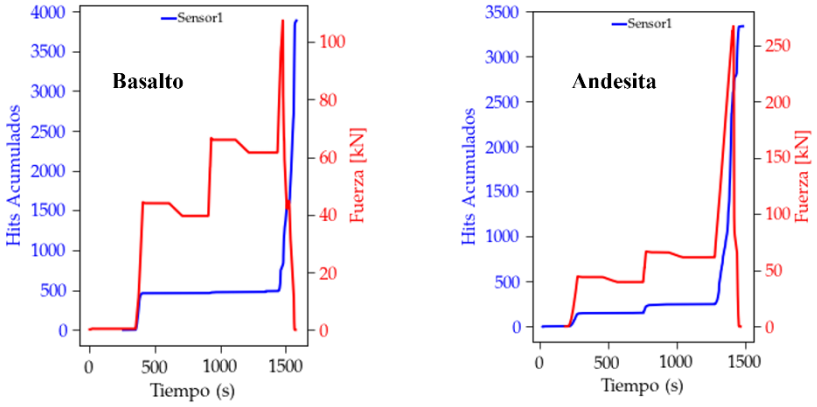


Figura 6. Hits acumulados en función del tiempo

Cuentas

El parámetro número de cuentas se refiere al número de veces que la amplitud de una señal excede un cierto umbral de voltaje predefinido para cada hit de EA. En la figura 7 se observa el número de cuentas acumuladas registradas de EA para cada muestra de roca función del tiempo de ensayo. En los dos casos hay un aumento en forma escalonada de cuentas cuando se aumenta la carga, compatibles, según estudios de EA en la literatura, con la aparición y crecimiento de fisuras dentro de las probetas de roca. Luego en la última etapa de aumento de carga se produce el mayor salto en las cuentas acumuladas correspondiéndose a la rotura final y coincidente con la máxima fuerza aplicada a la roca.

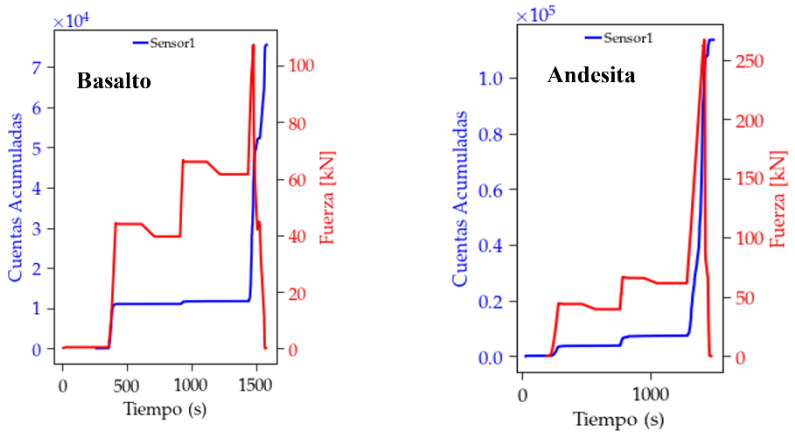


Figura 7. Las cuentas registradas por el sensor 1 en función del tiempo para las muestras de Basalto y Andesita. La línea roja representa la curva de fuerza aplicada en el ensayo.

Energía

Este parámetro se define como el área bajo la envolvente de la señal de EA. En la figura 8 se observa como la Energía acumulada aumenta notoriamente al final del ensayo cuando se produce la fractura de la probeta. La Fig. 8 muestra como la Energía acumulada aumenta cerca del límite de la Fuerza máxima aplicada. Se observa también que si bien, en este caso, este parámetro es sensible a los procesos de deterioro gradual, lo es en menor grado que las cuentas acumuladas.

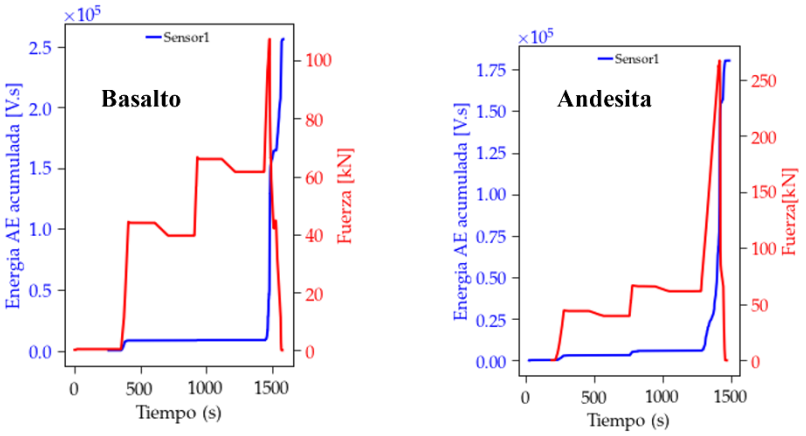


Figura 8. Las Energía Acumulada por el sensor 1 en función del tiempo para las muestras de Basalto y Andesita. La línea roja representa la curva de fuerza aplicada en el ensayo.

Fractura tipo tensil o corte

A continuación, se presentan los intervalos de tiempo correspondientes a las distintas etapas del ensayo para el sensor 1, junto con el análisis respectivo de los resultados obtenidos. Durante cada intervalo, se examinaron las tendencias de los parámetros secundarios RA y FM para determinar los modos de ruptura predominantes (tensil o corte). Aunque el método FM-RA es el más utilizado para clasificar AE señales, la determinación de la pendiente de la línea divisoria varía entre estudios. En esta investigación, se utilizó la relación (FM_{max}/RA_{max}) para la línea divisoria.

Intervalo 1 (155-257 s)-Aumentó la carga

En este intervalo, el sensor 1 registró 1146 hits en el Basalto y 631 en la Andesita. La carga aplicada al Basalto aumentó por primera vez hasta 45 kN. La Fig. 8 muestra la amplitud máxima de los eventos en ambas muestras y su clasificación en fracturas tensiles y por corte mediante el gráfico FM vs RA. En el Basalto, 37.70% de los eventos fueron tensiles y 62.30% por corte (Fig. 8a), mientras que en la Andesita predominó el modo tensil con 56.56%, frente a 43.44% por corte (Fig. 8b).

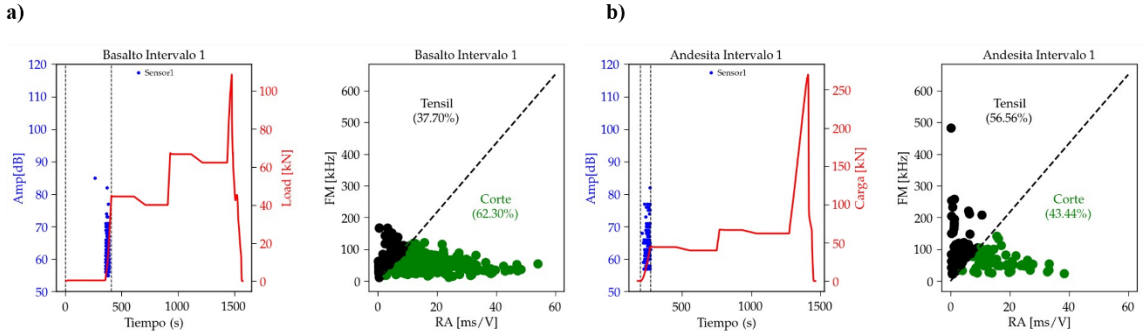


Figura 8. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 1. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 8a) Basalto y 8b) Andesita.

Intervalo 2 (257-633s)-Carga constante

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante y disminuyó en el último tramo. Se registraron para el sensor 1 un total de 17 hits para el Basalto y 27 para la Andesita. La Fig. 9 ilustra la amplitud máxima de los eventos identificados en el canal 1, así como la clasificación de los hits en términos de modos de fractura tipo tensión o corte, basándose en el gráfico FM vs RA. En el Basalto, 23.53% de los eventos fueron tensiles y 76.47% por corte (Fig. 9a), de igual forma en Andesita predominó el modo corte con 48.15%, frente a 51.85% por corte (Fig. 9b).

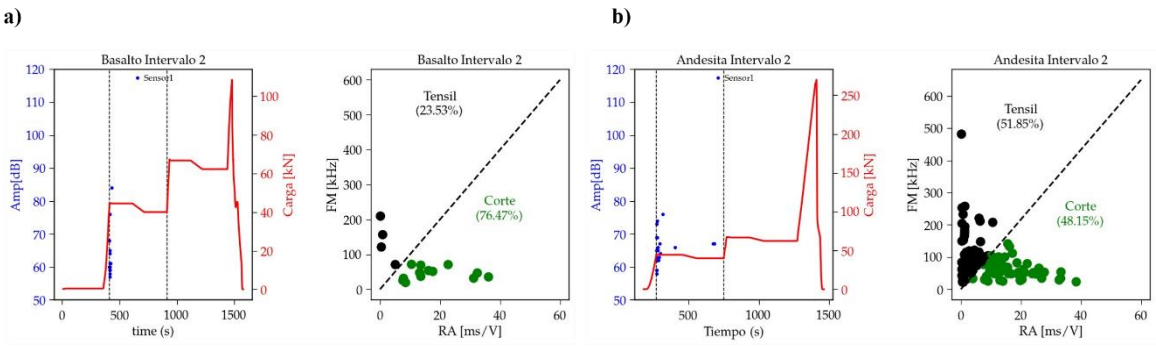


Figura 9. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 2. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 9a) Basalto y 9b) Andesita

Intervalo 3 -Carga aumentó

En este intervalo la carga aplicada a las muestras aumenta por segunda vez hasta 65kN Se identificaron en el sensor 1 un total de 9 hits para el Basalto y 51 hits para la Andesita. La figura 10 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con modo fractura tipo tensil o corte en función del gráfico FM vs RA. En el Basalto, 88.89% de los eventos fueron tensiles y 11.11% por corte (Fig. 10a), de igual forma en Andesita predominó el modo Tensil con 66.67%, frente a 33.33% por corte (Fig.10b).

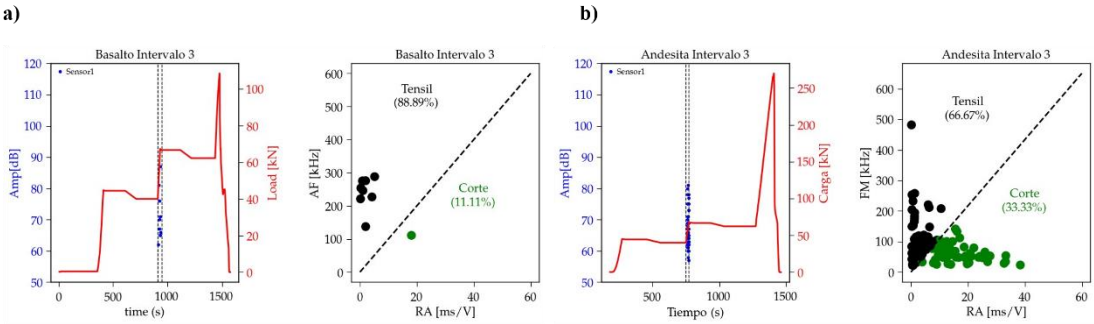


Figura 10. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 3. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 10a) Basalto y 10b) Andesita

Intervalo 4 --Carga constante

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante, disminuyo y luego volvió a mantenerse constante en el último tramo. En el sensor 1 se identificaron 5 hits de EA para el Basalto y 45 hits para la Andesita. La Fig. 11 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con fractura tipo tensil o corte en función del gráfico FM vs RA. En el Basalto, 100% de los eventos fueron tensiles, mientras que en la Andesita predominó el modo Tensil con 62.22%, frente a 37.78% por corte (Fig.11b).

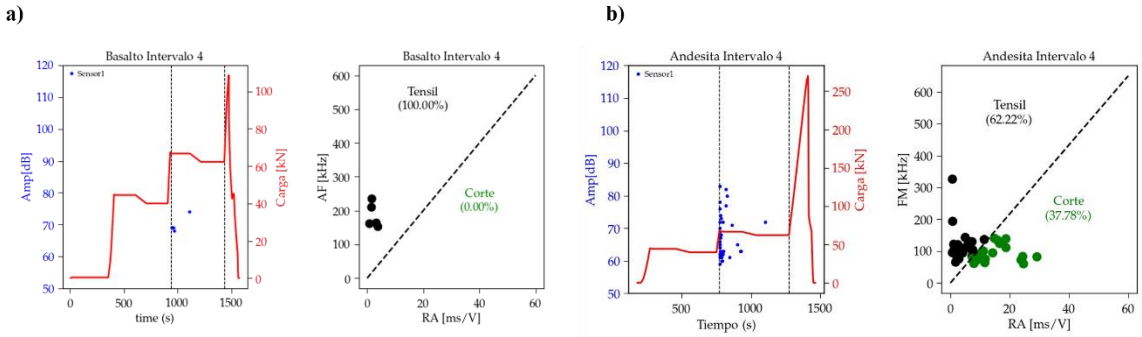


Figura 11. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 4. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 11a) Basalto y 11b) Andesita

Intervalo 5 Hasta máxima carga (fractura de roca)

En este intervalo, la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por tercera vez, desde 62 kN hasta 110 kN, momento en el que se produce la rotura de la roca en el Basalto y de 62kN hasta 266 kN donde se produce la rotura en la Andesita. Se identificaron 280 hits en el Basalto y 2210 en la Andesita. La Fig. 12 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con fractura tipo tensil o corte en función del gráfico FM vs RA. En el Basalto, 95.36% de los eventos fueron tensiles, de igual forma que en la Andesita predominó el modo Tensil con 76.22%, frente a 23.35% por corte (Fig.12b).

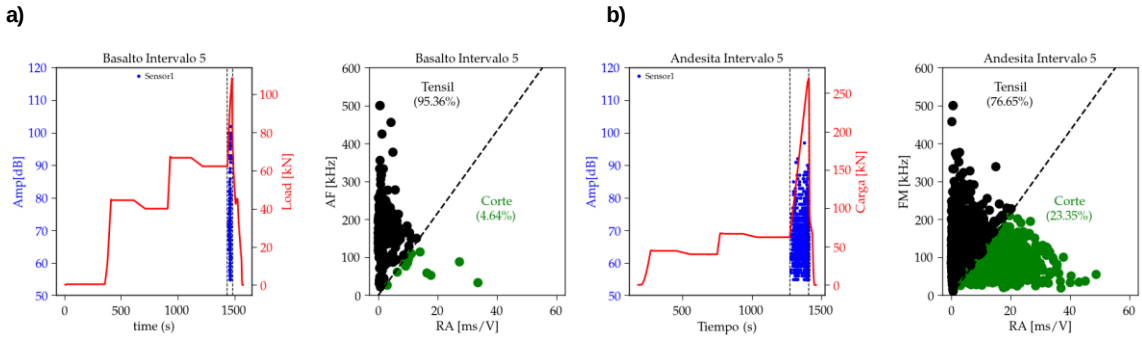


Figura 12. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 5. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 12a) Basalto y 12b) Andesita

Intervalo 6 (1122-1230s)-Después de máxima carga

En este intervalo, la carga aplicada disminuye a 0 después de alcanzar la rotura de roca en el pico máximo anterior de carga. Se identificaron 3053 hits en el Basalto y 881 en la Andesita. La Fig. 13 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con fractura tipo tensil o corte en función del gráfico FM vs RA. En el Basalto, 61.71% de los eventos fueron corte en relación al 38.29% de modo Tensil. De igual forma, en la Andesita predominó el modo Corte con 66.86%, frente a 33.14% por corte (Fig.13b).

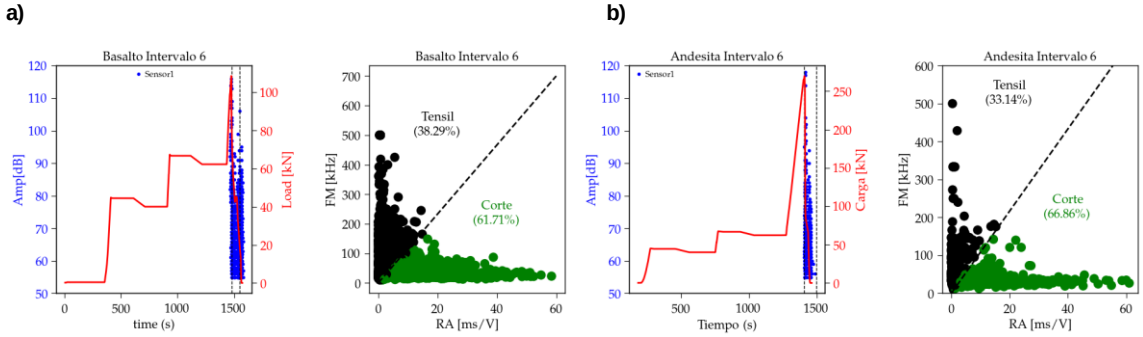


Figura 13. Amplitud máxima y clasificación de los hits según modos de fractura (tensil o corte) en el gráfico FM vs RA para el intervalo 5. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. 13a) Basalto y 13b) Andesita.

CONCLUSIONES

Este estudio comparativo entre el Basalto y la Andesita bajo compresión uniaxial ha permitido extraer conclusiones relevantes sobre su comportamiento mecánico y la evolución del daño mediante Emisión Acústica (EA). El análisis de los parámetros acústicos indicó que, en ambos materiales, la tasa de eventos de EA aumentó notablemente a partir de los dos tercios de la carga máxima. Este comportamiento sugiere que, en esa fase, se inicia un proceso crítico de microfisuración interna que acelera la degradación estructural del material. Sin embargo, se observó que al mantener constante la carga, la actividad acústica disminuye, lo que indica que las microfisuras tienden a estabilizarse temporalmente en ausencia de un incremento adicional de tensión.

Un hallazgo clave fue la predominancia de fracturas de corte en la etapa final del ensayo, especialmente evidente en ambos materiales, pero con mayor incidencia en la Andesita (73% de eventos de corte). Esto implica que los esfuerzos de cizallamiento juegan un papel determinante en el colapso estructural, incluso en rocas con alta capacidad de resistencia. En contraste, durante las fases iniciales y de carga constante, las fracturas tensiles tuvieron mayor participación, reflejando una transición en los modos de falla a medida que se acercaba la fractura final.

REFERENCIAS

Shang, X., Wang, Y., & Miao, R. (2022). Acoustic emission source location from P-wave arrival time corrected data and virtual field optimization method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *163*, 108129.

Calabrese, L., & Proverbio, E. (2020). A review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking. *Corrosion and Materials Degradation*, *2*(1), 1-30.

Ullah, B., Zhou, Z., Cai, X., Lu, J., & Zhao, C. C. (2023). Failure prediction and microcracks development based on acoustic emission and energy evolution for different rocks treated with freeze–thaw weathering. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(12), 471.

Qin, D., Chang, Z., & Xia, Z. (2024). Experiment Study on the Mechanical Behavior and Acoustic Emission Response of Thick and Hard Sandstone Roof in Xinjiang Mining Area. *Advances in Civil Engineering*, *2024*(1), 6205478.

Ou, J., Wang, E., Wang, X., Wang, B., & Zhu, G. (2024). Acoustic emission characteristics and damage evolution of different rocks under uniaxial compression conditions. *Scientific Reports*, *14*(1), 4179.

Li, Q., Qian, Y., Hu, Q., Jiang, Z., Xu, Y., Shang, X., ... & Li, W. (2022). Acoustic Emission Response Mechanism of Hydraulic Fracturing in Different Coal and Rock: A Laboratory Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *55*(8), 4657-4672.

Li, J., Lian, S., Huang, Y., & Wang, C. (2022). Study on crack classification criterion and failure evaluation index of red sandstone based on acoustic emission parameter analysis. *Sustainability*, *14*(9), 5143.

Liu, F., Guo, R., Lin, X., Zhang, X., Huang, S., Yang, F., & Cheng, X. (2022). Monitoring the damage evolution of reinforced concrete during tunnel boring machine hoisting by acoustic emission. *Construction and Building Materials*, *327*, 127000.

Jiao, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Fu, L., & Zhang, L. (2019). Investigation of fracture modes in pervious asphalt under splitting and compression based on acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, *211*, 209-220.

Shen, F., He, S., Song, D., He, X., & Yang, G. (2024). Response characteristics of acoustic emission signal and judgment criteria for different fracture modes. *Engineering Fracture Mechanics*, *296*, 109862.

Wang, T., Wang, L., Xue, F., & Xue, M. (2021). Identification of crack development in granite under triaxial compression based on the acoustic emission signal. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *17*(1), 1550147720986116.

Xu, Y., Hu, J., He, P., Wang, G., & Pan, H. (2024). Research on Acoustic Emission Characteristics and Crack Evolution during Rock Failure under Tensile and Tensile-and Compressive-Shear Stress States. *Applied Sciences*, *14*(2), 545.

Zhang, Z., Liu, X., Zhang, Y., Qin, X., & Khan, M. (2021). Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *111*, 102851.

FORTALECIMIENTO DE LA SEGURIDAD AMBIENTAL EN CENTRALES NUCLEARES: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INNOVADOR DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

Vorobioff J. [ab], Checozzi F. [ab], Garron Pinto T. [a], Antaurco G. [a], Nieva F. G. [a], Morgada M. [a,c], Boggio N.[abcd] , Filipussi D. [db],Nonino D.[a], Rinaldi C.[abcd]

[a]*Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*
[b]*Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CNEA, CONICET, Argentina*
[c]*CONICET, Argentina*
[d]*UNSAM, Argentina*

e-mail: jvorobioff@frba.utn.edu.ar

RESUMEN

El propósito de las plantas industriales nucleares abarca desde la generación de energía hasta la producción de radioisótopos para usos médicos y biológicos, gestión de residuos radiactivos y formación de expertos especializados. Sin embargo, los sistemas nucleares, aunque altamente complejos y sofisticados, no son infalibles, lo que impulsa la necesidad de mejorar continuamente las prácticas de gestión ambiental. El proyecto actual se centra en el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para la gestión ambiental en un Parque Industrial Nuclear. Este sistema busca monitorear amenazas previsibles, naturales o humanas, anticipando eventos adversos y reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades circundantes. Sin embargo, la gran cantidad de datos generados por estos SAT puede llevar a alarmas falsas o a no detectar situaciones de riesgo real. El proyecto propone la implementación de un SAT basado en telemetría, procesando datos con algoritmos de inteligencia computacional. Esto permitiría corregir las variaciones en los sensores, generar alertas efectivas ante peligros reales y descartar alarmas erróneas. Además, se emplearán diversos sensores (de gas, llama, temperatura, etc.) y se tomarán muestras de suelos y plantas para analizar contaminaciones ambientales mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS). La colaboración multidisciplinaria con expertos en química, física, matemáticas, electrónica, ciencias ambientales y análisis de datos será crucial para el desarrollo de estos algoritmos de inteligencia computacional. Se busca formar profesionales en estas tecnologías para su aplicación en organismos de control ambiental o para continuar investigando en estas áreas interdisciplinarias. En resumen, el proyecto busca mejorar la gestión ambiental en plantas nucleares mediante la implementación de un SAT que emplee tecnología avanzada, promoviendo la formación de recursos humanos especializados en estas áreas para aplicar y desarrollar estas tecnologías en el futuro.

Palabras Clave: Inteligencia computacional, Energía Nuclear, Gestión ambiental, Monitoreo de riesgos, Telemetría.

INTRODUCCIÓN

Las plantas industriales nucleares tienen varias funciones, incluyendo el diseño, la construcción y la operación de reactores para la investigación tecnológica y la generación de energía. Además, se producen radioisótopos para aplicaciones médicas y biológicas, se gestionan residuos radiactivos y se fomenta la capacitación de

profesionales altamente especializados. Estas instalaciones de energía nuclear se consideran entre los sistemas de energía más sofisticados y complejos desarrollados hasta el momento. Sin embargo, a pesar de estar bien diseñados y construidos, ningún sistema complejo puede garantizar una absoluta infalibilidad (François, 2011). El proyecto actual, centrado en Sensores y Procesamiento Inteligente de Datos para la Gestión Ambiental en plantas nucleares, busca mejorar el rendimiento ambiental mediante la implementación de nuevas prácticas y tecnologías. Se propone la creación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para mejorar el rendimiento ambiental en un Parque Industrial Nuclear, anticipando eventos adversos y reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades (Adam, 2011; Hoseok, 2021). Estos sistemas SAT funcionan mediante la recolección y procesamiento de datos para prever accidentes o contaminaciones ambientales. Sin embargo, la gestión inadecuada de esta información puede generar alarmas falsas o, en el peor de los casos, no identificar situaciones peligrosas (Sánchez Vázquez, 2017). Actualmente, aunque existen SAT, la falta de interconexión entre sensores, detectores y actuadores, así como el procesamiento poco cuidadoso de la información, pueden afectar la precisión de los resultados (Sang, 2022). El proyecto propone la implementación de un sistema de telemetría moderno junto con algoritmos de inteligencia computacional para manejar los datos y generar alertas en caso de situaciones de riesgo. El grupo de trabajo ha participado en proyectos de olfatometría, diseñando sensores de gas nanoestructurados en sala limpia (MOS), y ha trabajado en espectroscopia de plasma inducido por láser (LIBS) para analizar las composiciones químicas de tierras y suelos. El grupo de trabajo cuenta con una extensa experiencia en LIBS, sensores de gas, Narices Electrónicas (e-Nose) y diseño de dron cuadricóptero equipado con sensores de gas.

El SAT utiliza sensores de gas para fortalecer la seguridad en las plantas nucleares. Se propone emplear dispositivos remotos simples, de bajo costo y fácil instalación con comunicación inalámbrica o por cable para mejorar la seguridad en estas instalaciones. El empleo de algoritmos de aprendizaje automático permitirá identificar amenazas y generar alertas en tiempo real, al mismo tiempo que se descartarán alarmas falsas. Estos sistemas de seguridad se integrarán de manera independiente a los sistemas actuales o reemplazarán los existentes, reduciendo así los riesgos de accidentes y mejorando la supervisión del mantenimiento preventivo. Además, se llevará un control eficiente del tiempo de funcionamiento de las máquinas, sus parámetros relevantes y los gases emitidos. Esta información será crucial para diagnosticar fallas y facilitar la planificación de los mantenimientos preventivos. El proyecto también busca identificar compuestos volátiles que podrían indicar posibles amenazas de contaminación ambiental mediante sensores de gas. Se implementarán técnicas de procesamiento de datos para detectar contaminantes, como compuestos orgánicos volátiles en las plantas nucleares, y se desarrollará un procedimiento analítico para su detección, incluyendo la preparación de muestras e instrumentación, así como la determinación de los límites de detección. Además, se trabajará en la elaboración de un procedimiento o protocolo de análisis de estos compuestos para los diferentes sensores utilizados, incluyendo técnicas quimiométricas adaptadas a cada sistema. Se planea establecer las capacidades analíticas del sistema ensamblado mediante estudios de campo en espacios reducidos con condiciones controladas. También se desarrollará un procedimiento o protocolo de análisis de muestras utilizando la técnica LIBS (espectroscopia de plasma inducido por láser) e implementará algoritmos de inteligencia computacional para mejorar la precisión en el análisis de las muestras.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El sistema está compuesto por un software especializado en Procesamiento de Datos y Reconocimiento de Patrones para analizar diversas mediciones de gases. Este software emplea técnicas quimiométricas para clasificar y cuantificar analitos a partir de señales de sensores de gas. Sin embargo, las variaciones en las amplitudes y líneas de base de las mediciones afectan significativamente las señales capturadas. Por consiguiente, se implementa un software propio con algoritmos avanzados de procesamiento de datos, facilitando las tareas de procesamiento y siendo accesible para personal no especializado en manipulación de datos. La interfaz gráfica de usuario (GUI), desarrollada en Python, automatiza la lectura de datos, el preprocesamiento de señales, el análisis quimiométrico y la presentación de resultados (Shaw, 2018). La interfaz permite la selección y ajuste de parámetros de algoritmos de procesamiento de señales para comparar métodos y determinar los más efectivos (Atal, 2020). Los algoritmos incluyen técnicas como el Análisis Multivariado de datos, Análisis de Componentes Principales (PCA), gráficos con análisis estadísticos, Funciones Discriminantes, Inteligencia Computacional y Redes Neuronales, ampliamente utilizadas en diversos campos de investigación (Bershad, 2020). Además, esta interfaz junto con los algoritmos asociados puede ser adaptada para aplicaciones en el procesamiento de señales de diferentes sensores.

Por otro lado, en relación con la instalación de dispositivos remotos con sensores, se propone utilizar algoritmos de reconocimiento de patrones e inteligencia artificial para procesar una gran cantidad de información proveniente de mediciones con diferentes niveles de prioridad y confiabilidad. Estos algoritmos identifican patrones mediante aprendizaje automático para detectar y alertar sobre amenazas en tiempo real (Cai, 2020; Demuth, 2018). El sistema de aprendizaje ajusta los parámetros de procesamiento para optimizar la detección (Chandra, 2021).

Además, se destaca la importancia del reconocimiento de patrones, tanto con métodos estadísticos como con técnicas de inteligencia artificial (Haykin, 2014). Se mencionan métodos como análisis de componentes principales (PCA), análisis de factores discriminantes (DFA), regresión de cuadrados mínimos parciales (PLS) y algoritmos de separación de grupos como clúster jerárquico y k-means (Webb, 2011). Estos métodos, junto con enfoques de inteligencia artificial como redes neuronales artificiales (ANN) y lógica difusa, se aplican para abordar situaciones complejas donde los cálculos de regresión son insuficientes, estableciendo límites y estrategias de decisiones adecuadas (Sayed, 2014; Tan, 2008; Poularikas, 2006).

El sistema de telemetría y control inteligente comprende dispositivos remotos económicos, simples, de fácil instalación y conectividad inalámbrica o por cable. Estos dispositivos envían datos a una computadora central para su procesamiento. Los sensores móviles integrados en estos dispositivos detectan áreas peligrosas, como fugas de gases, altas concentraciones de sustancias nocivas, temperaturas elevadas y violaciones de seguridad. Se sugiere una computadora central para la recepción, almacenamiento y procesamiento de datos utilizando algoritmos de regresión, reconocimiento de patrones e inteligencia artificial. Estos algoritmos identifican patrones mediante aprendizaje inteligente, alertando sobre amenazas en tiempo real y permitiendo interacción con el operador para ajustar parámetros y minimizar falsas alarmas. Los dispositivos tienen la electrónica necesaria para recolectar datos de

sensores de gas, temperatura, radiación, entre otros. Su ubicación estratégica abarca áreas confinadas, zonas con riesgo tóxico, maquinaria, desperdicios y proximidades a cuerpos de agua. Cuentan con diversas herramientas de detección y transmisión de señales, utilizando conexiones Ethernet para mediciones críticas y conexiones inalámbricas para otras situaciones. Se implementa redundancia en los dispositivos para mejorar la precisión y seguridad de las mediciones. Los sensores se enfocan en gases combustibles, tóxicos, solventes, dióxido de carbono, emisiones de nafta y niveles de oxígeno.

En la Fig. 1 se muestra la cámara de sensores, donde se observan montados 6 sensores para medir diferentes gases. Dicha cámara fue realizada con impresora 3D.

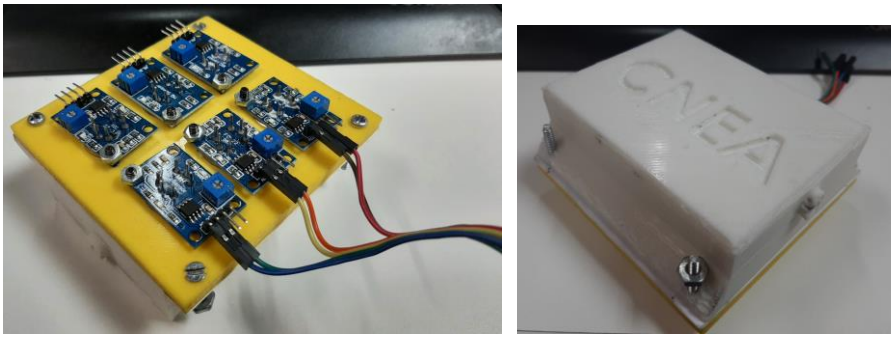


Figura 1. Cámara de sensores, vista superior e inferior

En la Fig. 2 se muestra un diagrama en bloques del monitor de gases

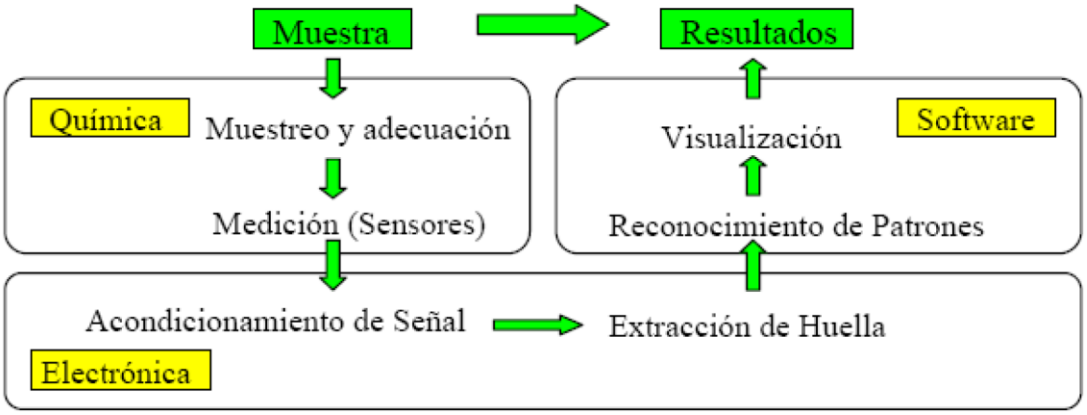


Figura 2. Diagrama en bloques del monitor de gases

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han logrado resultados prometedores mediante la utilización de diversos sensores de gas descritos a continuación:

Sensor de gas infrarrojo no dispersivo, modelo MH-Z19: Este sensor detecta la concentración de Dióxido de Carbono (CO2) en el aire, con un rango de 0 a 5000 ppm. Cuenta con compensación por temperatura y mide la concentración de CO2 independientemente del nivel de oxígeno. Su salida se realiza a través de interfaces UART y PWM. Utiliza un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) que somete el gas

CO2 a luz infrarroja y mide la diferencia en la longitud de onda para obtener la concentración de CO2 en partes por millón (ppm).

Sensores de gas tipo MOS (Metal Óxido Semiconductor): Estos sensores juegan un rol crucial en diversas aplicaciones tecnológicas cotidianas, incluyendo la detección de compuestos tóxicos, gases explosivos, monitoreo ambiental y recientemente, diagnóstico de enfermedades, maduración de frutas y detección de plagas en cultivos. Los sensores de gas de estado sólido, especialmente los tipos resistivos, se han destacado por su facilidad de fabricación, bajo costo, simplicidad operativa y capacidad de miniaturización. Estos sensores cuentan con una película de detección cuya conductividad es altamente sensible a las sustancias presentes en el ambiente circundante. El desarrollo de estos sensores ha avanzado gracias a la nanotecnología, empleando materiales nanoestructurados con una alta relación superficie/volumen, superficie específica elevada y bordes cristalinos altamente reactivos, permitiendo una mayor interacción entre moléculas de gas y los materiales sensoriales.

A continuación, se describen algunos modelos de sensores MOS nanoestructurados con sus respectivas funciones:

Sensor MQ-9 de Gas Combustible y Monóxido de Carbono: Ofrece ajuste de sensibilidad y tamaños compactos, facilitando su utilización. Dispone de salidas digital y analógica que pueden ser interpretadas por microcontroladores o tarjetas de desarrollo. Detecta CO en concentraciones de 10 a 1000 ppm y gases combustibles en concentraciones de 100 a 10000 ppm.

Sensor MQ7: Se utiliza en sistemas de protección contra incendios y es altamente sensible a H2 y monóxido de carbono, con capacidad para detectar concentraciones de 20 a 2000 ppm de CO. Cuenta con una salida analógica y sensibilidad ajustable.

MQ5, MQ2, MQ4, MQ6 y MQ8: Estos sensores se utilizan para la detección de diferentes tipos de gases como metano, gas licuado, hidrógeno, entre otros. Sus rangos de detección y gases característicos varían según el modelo.

Estos sensores son fundamentales en una amplia gama de aplicaciones, desde la seguridad industrial y pública hasta el monitoreo ambiental nuclear, proporcionando detección precisa y adaptabilidad a distintos entornos y compuestos gaseosos.

Se emplea un Banco de Gases para probar y ajustar los sensores. Este dispositivo permite generar distintas combinaciones controladas de gases, que son dirigidas hacia una cámara donde se encuentran instalados dichos sensores. El sistema gestiona con precisión las cantidades de diversas sustancias gaseosas que componen una mezcla en una cámara de medición. El control de la mezcla gaseosa se lleva a cabo mediante una computadora conectada a un dispositivo de control del hardware. Los componentes del equipo de gas incluyen la línea de gases, 4 medidores de flujo másico (llamados Controladores de Flujo Másico o MFC), válvulas eléctricas, un humidificador y un regulador que suministra una combinación de gases con flujo, humedad y concentraciones controladas. La línea de gases puede generar mezclas de gases con niveles de humedad controlados dentro del rango de concentración deseado. El proceso de mezcla se logra con gran precisión gracias a los MFC, que permiten regular con precisión el flujo de masa de un gas. Una vez obtenida la combinación deseada, se dirige hacia la cámara de medición donde están ubicados los sensores. Este dispositivo de gases garantiza la pureza de las mezclas gaseosas que se introducen en la cámara, así

como el control del flujo y la concentración del contaminante con el que se pretende trabajar. Se emplea un software diseñado específicamente para enviar instrucciones al controlador de MFC, registrar los flujos de cada línea de gases y controlar la apertura y cierre de las válvulas eléctricas. Se busca automatizar los procesos de mezcla de gases mediante la implementación de secuencias de mediciones. Estas secuencias se compondrán de intervalos de tiempo con diferentes configuraciones de mezclas gaseosas. La lectura de los flujos de gas se realiza mediante el software del equipo de gases y se representará gráficamente en tiempo real.

A modo de ejemplo, en la Fig. 3 se muestra la respuesta de un sensor de gas ante la presencia de distintas concentraciones de CO.

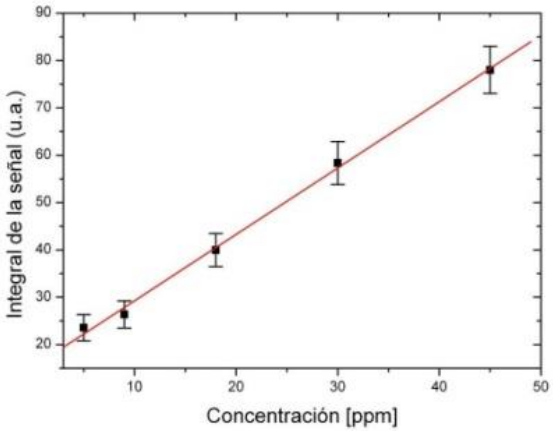


Figura 3. Caracterización de sensores de SnO_2. Gráfico del valor de la integral de la señal para distintas concentraciones de CO. (■) Valor Medio, (—) Ajuste lineal

Procesamiento

Para distinguir compuestos volátiles se deben utilizar varios sensores de gas y procesar las señales adecuadamente. En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de respuesta de 10 sensores y proyección a un plano de 2 dimensiones mediante Análisis de Componentes Principales (PCA). Se puede aplicar PCA u otras técnicas avanzadas de procesamiento.

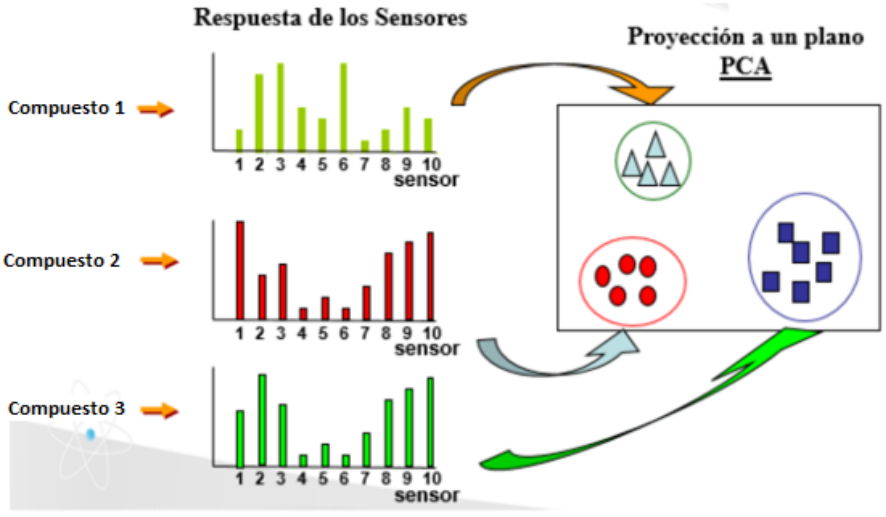


Figura 4. Ejemplo de proyección a 2 dimensiones mediante el método de PCA

 ISBN 978-987-1323-91-3

CONCLUSIONES

El banco de gases no solo ofrece una manipulación precisa de las combinaciones de gases, sino que también asegura la calidad y confiabilidad de las pruebas de sensores, al tiempo que aprovecha la automatización y la capacidad de registro y control ofrecida por el software especializado.

El proyecto propuesto combina conocimientos de diversas disciplinas como la informática, la química, la ingeniería de sensores y la inteligencia artificial para crear un sistema integral de monitoreo y análisis de gases. La implementación de algoritmos avanzados de procesamiento de datos y técnicas de reconocimiento de patrones, como el uso de inteligencia artificial, muestra una adopción significativa de tecnología de vanguardia en el campo del análisis de datos de sensores.

La redundancia en las mediciones, la priorización de la información según su relevancia y confiabilidad, y la capacidad de generar alertas en tiempo real indican un enfoque sólido hacia la fiabilidad y la seguridad en el monitoreo de gases, especialmente en entornos críticos como las plantas nucleares.

Aunque el enfoque principal se centra en el monitoreo de gases en plantas nucleares, se sugiere la posibilidad de adaptar y aplicar esta metodología y los dispositivos propuestos a otras áreas, como el monitoreo ambiental, la detección de amenazas y la seguridad industrial.

En resumen, el proyecto muestra un enfoque integral y tecnológicamente avanzado para abordar la detección y el análisis de gases, priorizando la fiabilidad, la seguridad y la innovación en el campo de los sensores y la inteligencia artificial. Su aplicabilidad potencial en distintos ámbitos resalta su versatilidad y escalabilidad.

REFERENCIAS

Adam Corner, Dan Venables, Alexa Spence, Wouter Poortinga, Christina Demski, Nick Pidgeon, Nuclear power, climate change and energy security: Exploring British public attitudes, Energy Policy, Volume 39, Issue 9, 2011, Pages 4823-4833, ISSN 0301-4215, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.037.

Atal, D. K., & Singh, M. (2020). Arrhythmia Classification with ECG signals based on the Optimization-Enabled Deep Convolutional Neural Network. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 196. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105607

Bershad, N. J., & Bermudez, J. C. M. (2020). A switched variable step size NLMS adaptive filter. Digital Signal Processing: A Review Journal, 101. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102730

Boveiri, H. R., Khayami, R., Javidan, R., & MehdiZadeh, A. R. (2020). Medical image registration using deep neural networks: A comprehensive review. In arXiv.

Caceres J.O., Moncayo S,. Rosales J.D, Manuel de Villena F.J,. Alvira F.C, Bilmes G.M. Application of Laser- Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Neural Networks to Olive Oils Analysis, APPLIED SPECTROSCOPY, 67, 9, 1064-1072, 2013.

Cai, Y., Yu, Z., Mo, D., Liu, R., Chen, A., Dai, B., & Li, Y. (2020). Noise reduction with adaptive filtering scheme on interferometric fiber optic hydrophone. Optik, 211. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164648

Chandra, M., Goel, P., Anand, A., & Kar, A. (2021). Design and analysis of improved high-speed adaptive filter architectures for ECG signal denoising. Biomedical Signal Processing and Control, 63. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102221

Demuth H, Beale M, Hagan M. (2018). Neural Network Toolbox™ User's Guide Neural network toolbox. MathWorks.

François Diaz Maurin (2011). Fukushima: Consequences of Systemic Problems in Nuclear Plant Design, Economic & Political Weekly (Mumbai) Vol. 46, No. 13, pp.10–12, 26 March, 2011.

Haykin, Simon S. (2014) Adaptive filter theory, 5th Edition. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson. Print. ISBN-13: 978-0132671453 / ISBN-10: 013267145X

Hoseok Nam, Satoshi Konishi, Ki-Woo Nam, Comparative analysis of decision making regarding nuclear policy after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident: Case study in Germany and Japan, Technology in Society, Volume 67, 2021, 101735, ISSN 0160-791X, https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101735.

Manzoor S, Moncayo S, Navarro-Villoslada F, Ayala JA, Izquierdo-Hornillos R, de Villena FJM, Cáceres J.O. Rapid identification and discrimination of bacterial strains by laser induced Breakdown Spectroscopy and neural networks. Talanta, 212: 65-70.2014

Sánchez Vázquez Luis, Eguiguren Riofrío María Beatriz. Aportes teórico-metodológicos para un Sistema de Alerta Temprana de conflictos socioambientales. Experiencias en torno al Proyecto Mirador, Ecuador, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Volume 2017, Issue 93, 2017, Pages 61-75, ISSN 0188-4611, https://doi.org/10.14350/rig.52264.

Perillo, P.M. , Rodríguez D.F. Influence of Fluoride Content on the Anodic Formation of TiO2 Nanopores/Nanotubes in Ti Films. AASCIT Communications, Volume 2, Issue 1 January 30, (2015), 11-17.

Sang Min Han, Chanyoung Lee, Young Ho Chae, Poong Hyun Seong, A study on classification of the security controls for the effective implementation to nuclear power plant, Nuclear Engineering and Technology, Volume 54, Issue 4, 2022, Pages 1245-1252, ISSN 1738-5733,

Sayed, A. H. (2014). Adaptive networks. Proceedings of the IEEE, 102(4). https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2306253

Sayed, Ali H. (2008) Adaptive filters. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience IEEE Press. ISBN ISBN:9780470253885. https://doi.org/10.1002/9780470374122

Shaw, Z. (2018). Learn more Python 3 the hard way: the next step for new Python programmers. Boston: Addison-Wesley.

Spelta, M. J. M., & Martins, W. A. (2020). Normalized LMS algorithm and data-selective strategies for adaptive graph signal estimation. Signal Processing, 167. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107326

Poularikas, Alexander D., and Zayed M. Ramadan (2006). Adaptive filtering primer with MATLAB. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis. Print. ISBN-13: 978-0849370434. ISBN-10: 0849370434

Tan, Li. (2008) Digital signal processing: fundamentals and applications. Amsterdam Boston: Academic Press, 2008. ISBN 978-0-12-374090-8

Webb, A. R., & Copsey, K. D. (2011). Statistical Pattern Recognition: Third Edition. In Statistical Pattern Recognition: Third Edition. https://doi.org/10.1002/9781119952954

INSPECCIÓN DE EDIFICACIONES POST-SISMO EN ECUADOR 2023

Hernán D. Xargay [ab]

[a] *Departamento ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ARGENTINA*
[b] *Departamento de Construcciones y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: hxargay@fi.uba.ar

RESUMEN

El 18 de marzo de 2023 ocurrió un sismo de 6.6 Mw de magnitud en la provincia de Guayas de la República del Ecuador, afectando principalmente la zona centro-sur del país y, en menor medida, el noreste de la República de Perú. El epicentro se localizó frente a la costa del Cantón Balao en la zona del golfo de Guayaquil y su hipocentro, a unos 63 km de profundidad.
De manera inmediata al evento sísmico se activaron los protocolos de respuesta a desastres y, en particular en lo que refiere a vivienda e infraestructura, para realizar las inspecciones rápidas visuales de acuerdo a la metodología de la Guía de Diseño 5 del Ecuador. Las mismas tuvieron por objetivo verificar y catalogar el estado de daño de las construcciones afectadas con rótulos que indican a la población su nivel de riesgo.
Según el relevamiento realizado por los entes públicos, el sismo causó daños importantes en las provincias ecuatorianas de Azuay, El Oro y Guayas, y hubo que lamentar 14 personas muertas, 500 heridos y 3700 personas afectadas. En lo que respecta a infraestructura y vivienda, se informaron afectaciones en 331 unidades educativas, 57 centros de salud, 61 bienes públicos, 77 bienes privados y 1030 viviendas. Por su parte, 277 viviendas y 8 bienes públicos resultaron destruidos. A partir de los resultados de las inspecciones post-evento, el cantón Machala en la provincia El Oro, fue el más afectado.
En este trabajo se presentan y discuten algunas afectaciones en las edificaciones producidas por el sismo y aspectos de la respuesta al evento que resultan de interés para su aplicación en la República Argentina y otros países de la región.

Palabras Clave: Sismo, Ecuador, Gestión de riesgos, Construcciones, Inspección.

INTRODUCCIÓN

El 18 de marzo de 2023, un sismo de 6.6 Mw de magnitud sacudió la provincia de Guayas en Ecuador, afectando principalmente la zona centro-sur del país. El epicentro se localizó frente a la costa del Cantón Balao en la zona del golfo de Guayaquil y su hipocentro se situó a unos 63 km de profundidad. De manera inmediata al evento sísmico, se activaron los protocolos de respuesta a desastres coordinado por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SGR) de la República de Ecuador. En particular, se implementaron inspecciones rápidas visuales de construcciones afectadas de acuerdo a la metodología detallada en la Guía de Diseño 5 del Ecuador, con el objetivo de verificar y catalogar el estado de daño de las construcciones afectadas mediante rótulos que indican a la población su nivel de riesgo y, eventualmente, la necesidad de conducir evaluaciones más profundas para finalizar su evaluación.

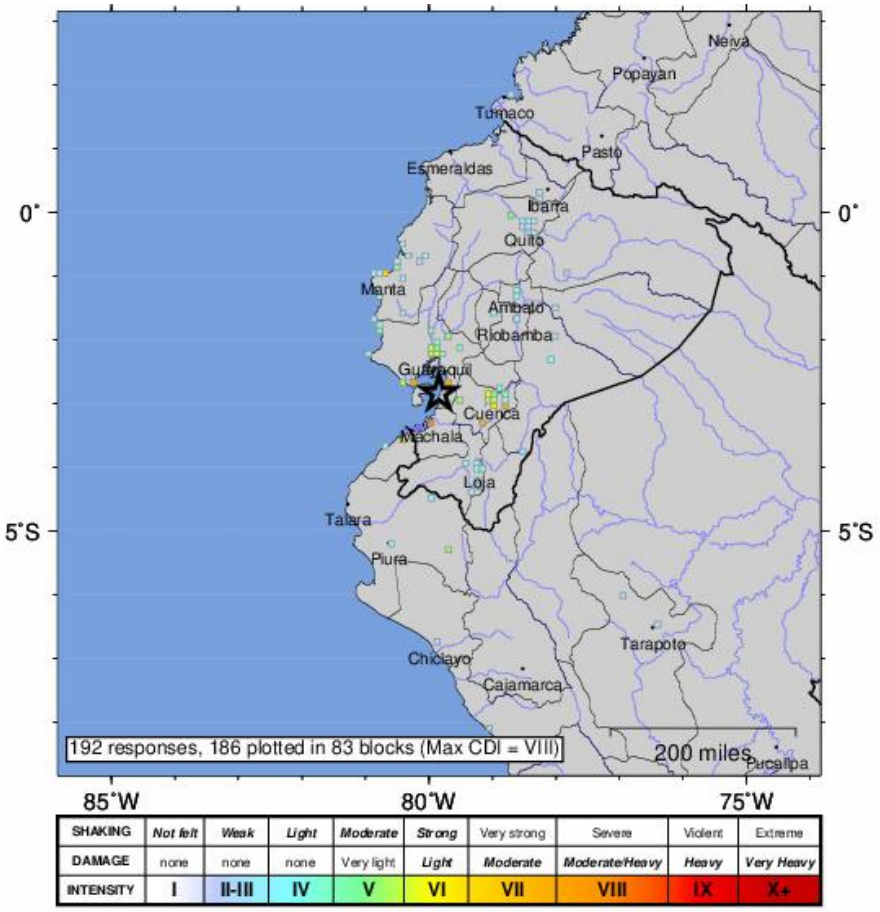


Figura 1: Localización geográfica del epicentro y escala de intensidades.
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Ecuador_de_2023

Según el relevamiento realizado por los entes públicos, el sismo causó daños significativos en las provincias ecuatorianas de Azuay, El Oro y Guayas, con 14 personas muertas, 500 heridas y 3700 personas afectadas. En cuanto a infraestructura y vivienda, se informaron afectaciones en 331 unidades educativas, 57 centros de salud, 61 bienes públicos, 77 bienes privados y 1030 viviendas. Además, 277 viviendas y 8 bienes públicos resultaron destruidos. El cantón Machala, en la provincia de El Oro, fue identificado como el más afectado.

El sistema de gestión de riesgos de Ecuador está diseñado para responder eficientemente a desastres naturales a través de diversas instituciones y mecanismos. Uno de los organismos clave es el Comité de Operaciones de Emergencia (COE), que coordina las acciones de respuesta y recuperación. El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) también juega un papel crucial, especialmente en la coordinación de la Mesa de Trabajo número 7, para la evaluación rápida visual de daños en edificaciones mediante la Guía 5 de Ecuador, basada en el estándar estadounidense ATC-20 mundialmente utilizado.

En respuesta al sismo, diversos equipos de inspectores se trasladaron desde Quito y otras partes del país a la provincia de El Oro, concentrándose en la ciudad de Machala y el cantón Pasaje. En coordinación con las autoridades civiles y militares locales, se realizaron inspecciones visuales rápidas en edificaciones afectadas principalmente durante los tres días posteriores al evento. Las inspecciones emplearon un sistema de pancartas de colores que se adhieren visiblemente a las construcciones: verde (INSPECCIONADA), amarillo (USO RESTRINGIDO) y rojo (INSEGURO), para catalogar el estado de las estructuras según los criterios de seguridad y habitabilidad.

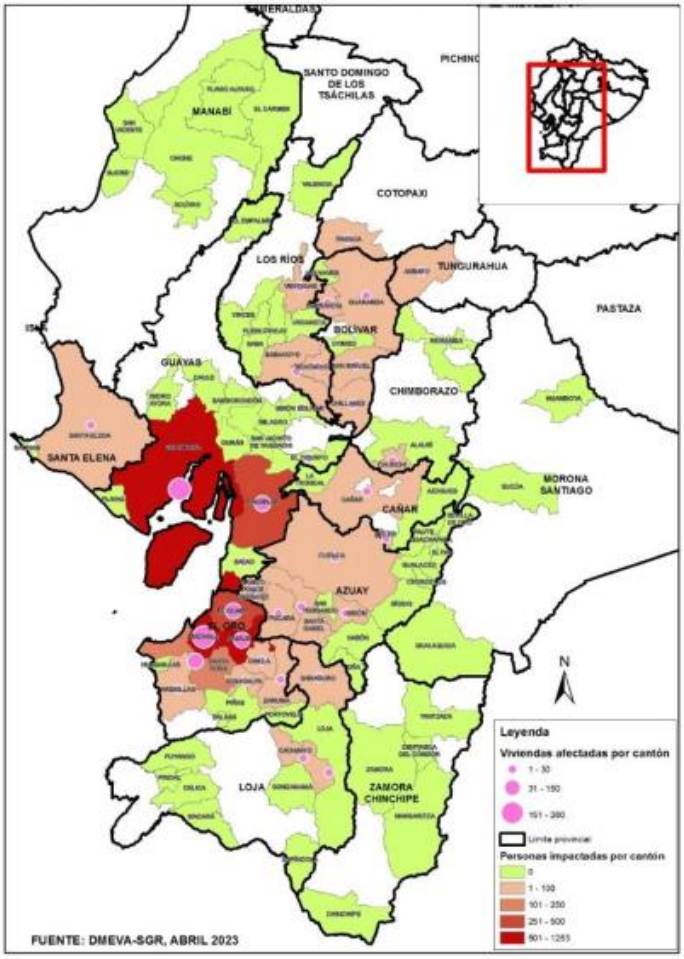


Figura 2: Mapa de personas impactadas y viviendas afectadas por el sismo.
Fuente: SitRep No. 31 – Sismo Balao, Guayas - Dirección de monitoreo de eventos adversos

EVALUACIONES RÁPIDAS DE DAÑOS

Las inspecciones se realizaron siguiendo los pasos del método ATC-20. Los aspectos evaluados fueron la condición exterior de la estructura, el suelo y pavimento, la necesidad de ingreso a la edificación, y la utilización de criterios específicos para determinar el estado de daño.

Provincia	Cantón	Viviendas	Semáforo	Semáforo	Semáforo
Azuay	Cuenca	44	11	11	22
	Pucará	40	28	9	3
	Nabón	100	48	39	13
	Santa Isabel	53	8	20	25
	Girón	20	0	7	13
	Camilo Ponce Enríquez	21	5	10	6
Cañar	Cañar	5	0	5	0
	Déleg	2	0	0	2
Guayas	Balao	2	1	0	1
	Guayaquil	66	12	22	32
	Naranjal	36	3	22	11
El Oro	Machala	243	46	91	106
	Pasaje	218	61	80	77
	EL Guabo	52	0	2	50
	Santa Rosa	59	11	24	24
	Arenillas	6	1	3	2
Total		967	235	345	387

Fuente: MIDUVI, SGR. Corte: 09/04/2023 – 19h00.

Figura 3: Evaluación técnica de viviendas de las zonas afectadas.
Fuente: SitRep No. 31 – Sismo Balao, Guayas - Dirección de monitoreo de eventos adversos

Características Generales de los Daños Observados

Las inspecciones revelaron varios problemas estructurales comunes en las edificaciones del cantón Pasaje:
- Columnas sin continuidad: Desplazamiento en relación al eje, construcciones informales que amplían la estructura sin seguir normas técnicas (errores constructivos).
- Cambios bruscos en las dimensiones geométricas de los elementos resistentes: Entre plantas, observándose diferencias significativas en columnas y vigas (errores de diseño).
- Estructuras esbeltas o alargadas: Con dimensiones de columnas menores en relación a la altura del entrepiso (errores de diseño).
- Fallas en plantas bajas: Debido a insuficiente capacidad de deformación y disipación de energía, especialmente en estructuras con planta baja conocida como "piso blando", que consiste en un cambio de rigidez sustancial con respecto a las plantas superiores (errores de diseño).
- Fisuras en losas y falta de continuidad en la construcción de losas planas con vigas banda o cinta (errores constructivos y de diseño).
- Daños estructurales en columnas: Evidenciados por fisuras profundas, indicando posible colapso inminente.
- Daños no estructurales en mamposterías: Evidenciados por discontinuidades significativas, desprendimientos de revoques, caída de muros, riesgo a la seguridad de las personas.
- Falta de control: Ausencia de supervisión en construcciones formales e informales, y no exigencia del cumplimiento de normas de construcción.

En la ciudad de Machala, las inspecciones incluyeron tanto edificaciones gubernamentales como privadas. Se observaron problemas similares, con algunos edificios requiriendo evacuación debido a daños severos en la mampostería. Sin embargo, algunas edificaciones demostraron una mejor respuesta estructural gracias al uso de sistemas constructivos más eficientes, como bloques de hormigón celular y rigidizadores adecuados.



Figura 4: Ejemplos de daños provocados por el sismo.

Problemáticas Observadas

La evaluación post-sísmica reveló varias problemáticas importantes:
- Cumplimiento de normas sismorresistentes: Muchas edificaciones no cumplen con la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC), especialmente en diseño sismorresistente.
- Control de permisos de construcción: Ausencia de control adecuado sobre los permisos de construcción, zonificación y actualización catastral.
- Habitabilidad en edificaciones dañadas: Habitantes continúan utilizando viviendas y locales comerciales con daños estructurales, lo que representa un riesgo significativo a la seguridad de las personas.

MISIÓN DE COOPERACIÓN TÉCNICA OIEA

Durante una semana del mes de junio de 2023, el autor formó parte de una misión de asistencia y cooperación técnica internacional junto a dos expertos en Ensayos No Destructivos aplicados a la ingeniería civil (END-IC o, en inglés, NDT-CE) provenientes de Chile y España en Machala, Ecuador. La misión fue patrocinada y organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
El OIEA había provisto al Ecuador de numerosos equipos END aplicables en el área de la ingeniería civil, que fueron recibidos por dos universidades de Quito: la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Esta donación fue impulsada por el catastrófico terremoto de 2016 en Pedernales. Personal de estas universidades recibió capacitación y certificación en el uso de métodos END en el

marco de un proyecto regional ARCAL entre 2018 y 2022, con el objetivo de fomentar el uso de END en situaciones de emergencias y desastres.
En este contexto, se realizó una misión para evaluar estructuras civiles afectadas por el sismo en Machala, en colaboración con personal de las universidades EPN y ESPE de Quito, la Universidad Técnica de Machala (UTMACH) y organismos públicos como la SGR y el MIDUVI. El objetivo central fue brindar entrenamiento y capacitación al personal local en END para ingeniería civil en condiciones reales en campo, especialmente en estructuras de hormigón armado, tipología predominante en la zona.



Figura 5: Personal implicado en la misión.

Técnicas Aplicadas y Capacitación

Durante la misión, se coordinó con actores y autoridades locales sobre las estructuras críticas afectadas por el sismo. Las técnicas aplicadas incluyeron:
- Inspección visual detallada: Evaluación del estado general desde el exterior, condiciones de seguridad para ingreso, identificación y condición de la estructura portante, detección de fisuras y desplomes.
- Detección y localización de armaduras mediante magnetometría.
- Evaluación de la uniformidad de la calidad del hormigón y/o discontinuidades: Velocidad de pulso ultrasónico, esclerometría y pulso-eco ultrasónico.









 ISBN 978-987-1323-91-3



Figura 6: Evaluaciones END en edificios afectados.

Movilización y Coordinación

Se coordinó la movilización del personal implicado y los equipamientos desde la ciudad de Quito a Machala. Personal de Machala nos recibió y participó activamente en la actividad, garantizando la transferencia del conocimiento. Se consiguió realizar la práctica en campo en condiciones reales de desastre y transmitir enseñanzas a los equipos de trabajo, que pudieron observar las diferencias entre la parte teórica-conceptual de los END y su aplicación en la práctica en estructuras afectadas.

Lecciones Aprendidas y Aplicación en la República Argentina

En Argentina, no existe una reglamentación específica sobre la evaluación rápida de construcciones post-sismo. La experiencia de Ecuador debería tomarse como lecciones aprendidas para desarrollar y establecer protocolos similares, a fin de estar preparados para futuros eventos sísmicos. Es crucial trabajar en la elaboración de una reglamentación que permita una evaluación rápida y eficiente de las edificaciones afectadas, garantizando la seguridad de la población y facilitando la recuperación post-desastre.

CONCLUSIONES

Importancia del Cumplimiento de Normas y Capacitación

Es fundamental respetar las normas sismorresistentes para reducir la vulnerabilidad ante eventos sísmicos. También ejercer estrictamente el control gubernamental sobre lo que se construye. Mantener los códigos de construcción actualizados y capacitar al personal encargado de las inspecciones inmediatas es esencial para garantizar una respuesta efectiva. Además, la capacitación de la sociedad para ser más resilientes ante desastres naturales contribuye a una mejor gestión del riesgo.

Uso de Ensayos No Destructivos

La utilización de ensayos no destructivos (END) es una herramienta fundamental para conocer en mayor profundidad los daños estructurales. Estas técnicas aumentan la confianza en las evaluaciones posteriores y son esenciales para la toma de decisiones en casos de edificaciones con pancartas amarillas y rojas. Los END permiten obtener información detallada sobre la integridad de las estructuras sin causar daños adicionales, lo que es vital para planificar la reparación y rehabilitación de las edificaciones afectadas. En el final de la misión, todos los participantes locales coincidieron en la necesidad de crear un grupo de trabajo en END a nivel nacional en Ecuador para fomentar su uso y coordinar futuras acciones.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al personal de Ecuador por la amable recepción, el gran esfuerzo realizado, su implicación y profesionalismo, y al OIEA por invitarme a ser parte de esta misión. También a mis compañeros de misión Abel Domato Jayo y Mario Barrera.

REFERENCIAS

Applied Technology Council (ATC). *ATC-20 Building Safety Evaluation Forms and Placards*. Redwood City, California: Applied Technology Council (2005).

Norma Ecuatoriana de la Construcción. *Guía práctica para evaluación sísmica y rehabilitación de estructuras*. Quito: Imprenta Activa (2016).

Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). *Manual de Prevención Sísmica*. San Juan: INPRES (2005).

Federal Emergency Management Agency (FEMA). *FEMA P-154, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook* (Third Edition). Preparado por Applied Technology Council, (2015).

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE MARTEMOTOS ANTE LA PRESENCIA DE DIFERENTES TIPOS DE RUIDO

Jair Zampieri[a], Danilo R. Velis[a,b] y Juan I. Sabbione[a,b]

[a]*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, ARGENTINA.*
[b]*CONICET, ARGENTINA.*

e-mail: jzampieri@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La misión Insight (Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) de la NASA obtuvo una gran cantidad de datos sísmicos marcianos que requieren el procesamiento y picado automático de eventos de martemotos. Los datos se caracterizan por la presencia de múltiples fuentes de ruido que presentan diversas cualidades, entre las que se destacan su alta amplitud y, en algunos casos, una significativa polarización. A su vez, los eventos marcianos presentan muy baja energía, por lo que su detección bajo la presencia de altos niveles de ruido resulta desafiante. El objetivo del trabajo es desarrollar e implementar estrategias para el filtrado de la energía de señales indeseadas y la posterior detección de eventos. Dicha detección se realiza mediante cuatro algoritmos de detección automática previamente utilizados en Sismología global. En un primer paso, el procesamiento propuesto se basa en el análisis de la variación de la energía presente en los sismogramas a lo largo de cada día marciano con el fin de discriminar los períodos exentos de variaciones causadas por los vientos y las altas temperaturas. Más allá de los ruidos de tipo climático, una de las principales dificultades está dada por la presencia de ruidos instrumentales de alta energía conocidos como glitches, que producen un enmascaramiento muy significativo de las señales de interés, lo que impide su correcta detección. Teniendo en cuenta la alta polarización lineal de este tipo de ruido, el método propuesto permite discriminarlo a través de la rotación del dato de manera tal que su energía quede contenida en una sola de las componentes. Esto se lleva a cabo mediante el uso de ventanas móviles que recorren el dato muestra a muestra. Como resultado, se logra que los glitches concentren la mayor parte de su energía en una única componente y las señales de interés en otra. En esta última se aplican los métodos de detección. Los resultados permiten concluir que el proceso de rotación facilita la detección de los eventos marcianos independientemente de la presencia de glitches. Esto, a su vez, favorece una eficaz comparación entre cada uno de los algoritmos de picado automático utilizados, permitiendo finalmente seleccionar el método más apropiado para procesar los datos marcianos.

Palabras Clave: *Sismología marciana*, Procesamiento de Señales, Detección Automática.

INTRODUCCIÓN

Las observaciones sismológicas consisten en el registro del movimiento del suelo a través de instrumentos de medición instalados en superficie. Estas mediciones requieren una etapa de procesamiento para permitir la posterior interpretación. Dicha etapa es de vital importancia en el picado de eventos que son registrados pero inicialmente no son visibles en las trazas.

Por su parte, los eventos sísmicos pueden ser caracterizados por diversas variables, entre las que se destacan las coordenadas de su hipocentro, la profundidad del mismo y su mecanismo focal. Conociendo los parámetros que dan origen al evento, es posible sacar

conclusiones acerca de las propiedades mecánicas del medio que las ondas atravesaron a partir de la teoría de propagación de ondas en medios elásticos. Dicho proceso se encuentra estrictamente ligado a una correcta detección y picado de los eventos registrados en los sismogramas. Luego, para la obtención de modelos complejos y precisos, se destaca la importancia de la detección de la mayor cantidad de eventos posible a partir de la implementación de algoritmos de picado automático.

En 2019, con el lanzamiento de la misión *InSight*, se logró adquirir por primera vez datos sísmicos de origen marciano de gran calidad. De esta forma se dio lugar al desafío de extrapolar todos los conocimientos adquiridos en esta rama de la ciencia para su aplicación en el planeta Marte. La utilización de los mismos no es directa, ya que los datos adquiridos presentan características que los diferencian sustancialmente de los datos terrestres.

Entre las características más importantes de los sismogramas se destaca una media de energía por evento que es notablemente menor a la presente en los observados en la Tierra, producto de una menor actividad tectónica en Marte (Giardini et al., 2020). Además de esto, el ruido presente en los sismogramas es considerablemente alto como resultado de la hostilidad de los vientos y gran amplitud térmica marciana (Ceylan et al., 2021). Como resultado, la relación señal-ruido de los eventos se ve fuertemente reducida. El desafío que presentan los datos de *InSight* destaca en la etapa de la detección y posterior picado de los posibles eventos registrados, momento en el cual la baja relación señal-ruido cobra mayor relevancia. Por otro lado, la gran cantidad de datos registrados (período mayor a 3 años) provoca que la tarea de picado manual resulte sumamente tediosa e imprecisa en muchos casos.

DATOS DE MARTE

MISIÓN INSIGHT

La misión *InSight* fue lanzada con destino a Marte el 5 de mayo de 2018, logrando el aterrizaje del *rover* el 26 de noviembre de 2018. A partir del momento de aterrizaje se comenzaron a contar los días marcianos (conocidos bajo el nombre de SOLs) utilizados para marcar la cronología de los distintos eventos de la misión. La misión se extendió hasta el 20 de diciembre de 2022, cuando el *rover* agotó sus baterías (Clinton et al., 2020; NASA, 2023).

Entre los múltiple sensores que acompañaron la misión se destaca el llamado paquete de equipos SEIS (*Seismic Expertiment for Interior Structure*). El mismo constó de 2 sismómetros de 3 componentes, ambos en una misma estación de medición. Uno de ellos es un sensor de banda-ancha (VBB) y el restante un sismómetro de corto período (SP). Las componentes de estos instrumentos no fueron orientadas según N, E y Z, sino que registraron con componentes genéricas U, V y W perpendiculares entre sí. Estas componentes fueron registradas con frecuencias de muestreo de 2, 10, 20 y 100 Hz (Lognonné et al., 2020).

El *lander* contó con un caparazón o escudo con el objetivo de reducir la exposición de los instrumentos a la amplia variación de temperatura y viento del ambiente marciano. *InSight* incluye una estación meteorológica completa para correlacionar los factores exteriores con las posibles variaciones en la señal registrada (Banerdt et al., 2020).

MARTE: CARACTERÍSTICAS GENERALES

Previo a la misión *InSight,* se conocía tamaño, masa y momento de inercia de Marte. A partir de estos datos se obtuvieron algunas estimaciones de la estructura interna del planeta. Adicionalmente, muestras de meteoritos y algunos otros estudios han robustecido esta información hasta cierto límite. Debido a la falta de datos geofísicos, se han estimado una gran variedad de modelos de su interior sin llegar a un acuerdo general. El período de rotación de Marte es algo mayor al de la Tierra, aproximadamente de 24 hs y 40 min. Este dato que es de gran relevancia para la visualización y procesamiento de los datos. El tamaño del planeta es intermedio entre el de la Tierra y la Luna, los únicos dos cuerpos con datos sísmicos y de flujo de calor hasta la fecha de lanzamiento. Este hecho lo posiciona como un planeta cuyo estudio es de particular interés (Smrekar et al., 2019). Por otro lado, la magnetización remanente en las rocas deja en claro la existencia pasada de un campo magnético global en el planeta, por lo que el estudio del estado actual de su núcleo fue uno de los objetivo de la misión.

RUIDOS AMBIENTALES

Los sismogramas de la misión contienen múltiples señales de origen no sísmico tales como ruidos atmosféricos y operacionales del *lander* que deben ser tenidos en consideración al analizar los datos. Dentro de estas señales indeseadas, una parte importante presenta firmas tanto temporales como en frecuencia que hacen más dificultosa aún su discriminación respecto a un evento de interés (Ceylan et al., 2021).

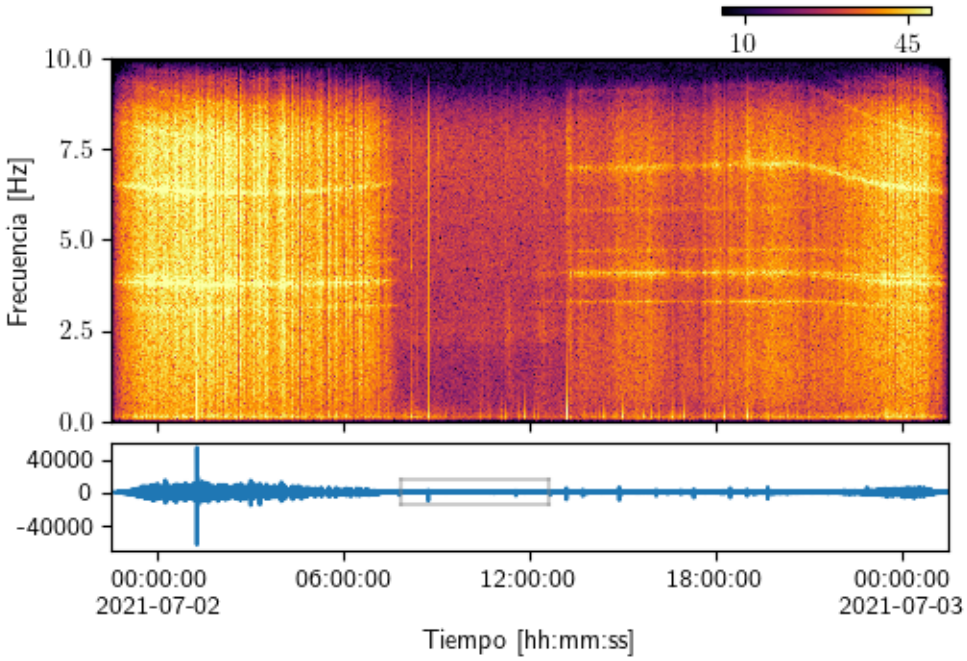


Figura 1. Espectrograma de componente W del día 02/07/2021.

La gran diferencia presente entre la media de ruido nocturno y la de ruido diurno resulta de gran relevancia en el procesamiento de estos datos. La misma viene dada por la considerable variación de los vientos durante el día, los cuales son estables durante la mañana temprana y luego presentan una transición hacia mayores turbulencias con

fuertes ráfagas en el medio día. Repentinamente, una hora antes de la puesta del sol las turbulencias se reducen y, consecuentemente, el ruido sísmico decae al nivel más bajo durante ese día marciano. Este período de calma habitualmente tiene una duración de entre 4 y 8 horas.

En la Figura 1 se distingue claramente el período de calma entre las 3:00AM y las 8:00AM del 2 de Julio de 2021, aproximadamente. Recordamos que se trabaja en horas UTC, por lo que estos horarios no son representativos del momento del día en Marte.

RUIDOS INSTRUMENTALES: *GLITCHES*

Por otro lado, existen otros agravantes que afectan la calidad de los datos. Se observaron grandes cantidades de fallas instrumentales que en muchos casos se manifiestan como señales de gran amplitud, identificadas bajo el nombre de *glitches*. Los *glitches* se caracterizan por ser de corta duración y contener usualmente energía en todo el espectro. Se considera que son causados por una liberación de tensión térmica acumulada en los sensores o en zonas próximas a los mismos.

En el dominio del tiempo, los *glitches* se manifiestan como pulsos unilaterales con duraciones de entre 25 y 30 segundos, independientemente de su amplitud que puede ser altamente variable. Contienen energía en un gran ancho de banda, con un rango de frecuencias desde valores menores a 1 Hz hasta la frecuencia de Nyquist.

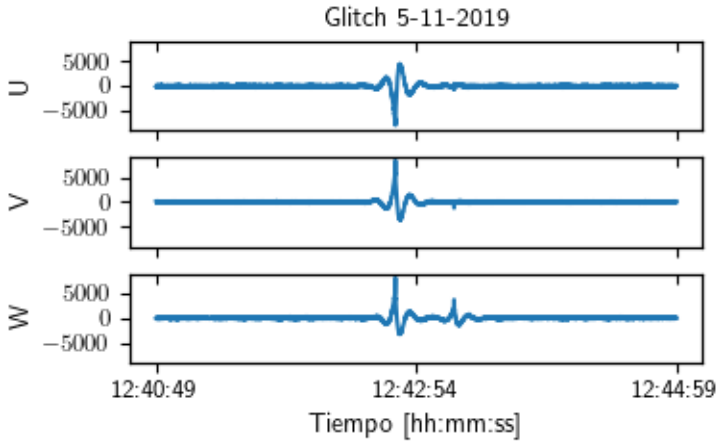


Figura 2. *Glitch* del día 05/11/2019.

Una característica importante de estos ruidos es su fuerte polarización lineal (Ceylan et al., 2021), característica que será utilizada para el tratamiento de los mismos en las próximas secciones.

MODOS DE RESONANCIA

Continuando el estudio de los datos, resulta de interés la visualización del contenido en frecuencia de la energía a la largo de un día marciano. Esto se estudia a través del gráfico de un espectrograma. Al calcular el espectrograma de una traza con duración de un día marciano y frecuencia de muestreo de 20 Hz, se pueden identificar múltiples

modos de resonancia. Entre estos, destaca una señal de resonancia con frecuencia alrededor de los 2.4 Hz, un tanto más tenue que el resto y con un ancho de banda mayor. La misma, a diferencia de las otras observadas, se asocia a un origen natural, más precisamente a una estructura interna del planeta que se encuentra cercana a la superficie. La amplitud de este modo de resonancia varía durante el día y es excitada en gran medida por la presencia de eventos sísmicos.

Los mencionados efectos generan que la naturaleza de los datos SEIS sea altamente variable, lo cual dificulta significativamente la detección automática de los eventos sísmicos. A esto se le adiciona la baja magnitud presente en la mayoría de los martemotos, complejizando aún más el problema.

EVENTOS MARCIANOS: CATÁLOGO

El modo de resonancia a los 2.4 Hz resulta de gran importancia en esta sección. Su principal característica es que no se ve fuertemente afectado por perturbaciones de ruidos locales, mientras que sí se ve amplificado ante la presencia de martemotos. Por lo tanto tiene gran capacidad en discriminar eventos para su detección. Su principal limitación está dada por la imposibilidad para detectar eventos con energía contenida fuera de estas frecuencias.

Los distintos equipos de científicos encargados del picado de los eventos utilizaron distintas técnicas. En primer lugar usaron filtros pasabandas con bandas relativamente angostas centradas donde los eventos presentan su mayor energía. De este modo, considerando la frecuencia natural de resonancia en 2.4 Hz, utilizaron filtros pasabanda entre 2.2 y 2.8 Hz con métodos de tipo STA/LTA. Las detecciones resultantes fueron entregadas al Mars Quake Service (MQS), entidad encargada de la elaboración del catálogo registrando todos los eventos (Catálogo MQS, 2022). Los picados obtenidos mediante los distintos métodos fueron luego verificados manualmente por operadores, y los que fueron confirmados se registraron junto a su relación señal-ruido, un índice de confiabilidad y sus tiempos de inicio y final.

CLASIFICACIONES Y FAMILIAS

Utilizando como referencia el catálogo provisto por el IRIS en su versión 14, publicado el 4 de Abril de 2023, se registraron un total de 2715 eventos categorizados como martemotos. El MQS propone la clasificación de los mencionados eventos en dos grandes familias, distinguiéndose principalmente por su contenido espectral. Para ambas familias se observaron largas duraciones que van desde algunos minutos hasta más de 30 min. Además se menciona una clase de evento extra con una duración mucho menor y contenido espectral restringido a frecuencias mayores a 5 Hz. Dependiendo a qué familia de eventos se asocia, el registro tendrá la mayor parte de su energía por encima o por debajo de la frecuencia de resonancia natural de 2.4 Hz. Un resumen de las distintas familias y sus características se muestra en la Tabla I. Por otra parte, para identificar la confiabilidad con la que se interpretaron los eventos, se utilizó una nomenclatura de calidad confeccionada por el MQS con letras desde la A hasta la D, donde la “A” está asociada a los eventos de mayor calidad y confiabilidad, y la “D” a los de menor calidad y confiabilidad.

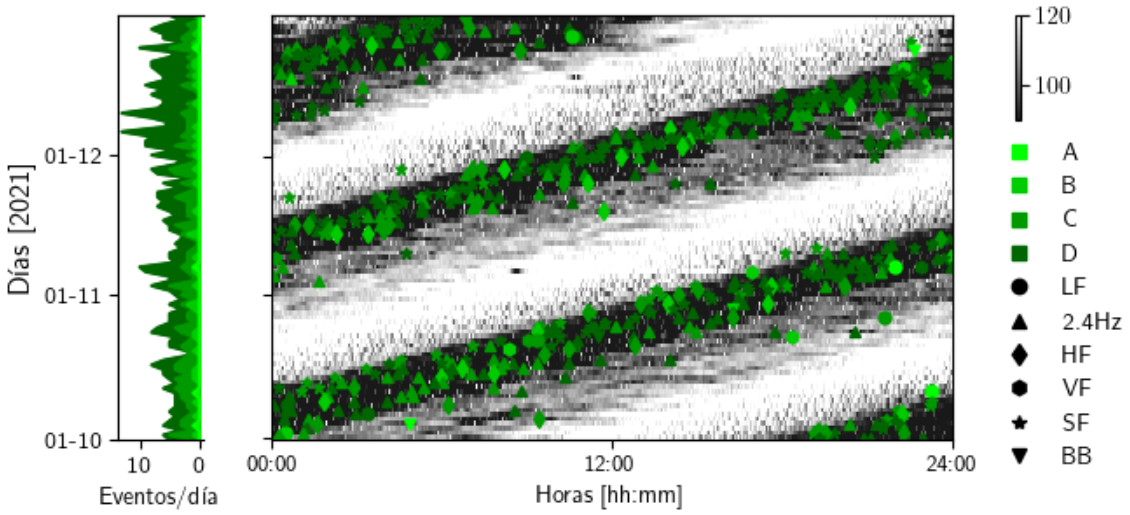


Figura 3. Eventos del catalogo sobre mapa de energía media de las trazas.

Los eventos detectados no resultaron regularmente distribuidos a lo largo de la misión, sino que se vieron fuertemente limitados por la variación del ruido ambiental. De esta manera, se puede apreciar que la gran mayoría de los eventos caracterizados por la MQS se encuentran en los períodos de calma nocturna. Las excepciones se dan para casos de martemotos con magnitud muy grande, clasificados así como eventos de calidad alta.

Tabla I. Resumen de las familias y tipos de eventos marcianos.

Familia de baja frecuencia	
Low Frecuency (LF)	Energía por debajo de los 2.4 Hz.
Broad-Band (BB)	Energía distribuida por debajo de los 2.4 Hz que puede excitar esta frecuencia también.
Familia de alta frecuencia	
High Frecuency (HF)	Energía predominantemente en los 2.4 Hz y por encima.
2.4 Hz	Energía predominantemente centrada en 2.4 Hz con limitada energía por fuera.
Very high Frecuency (VF)	Energía incluida en los 2.4 Hz pero centrada desde los 5 Hz hasta los 10 Hz.
Otras señales	
Super High Frecuency (SF)	Eventos de muy corta duración con frecuencias entre 5 y 10 Hz.

BASE TEÓRICA

MÉTODOS DE DETECCIÓN AUTOMÁTICA

En lo que se refiere a la detección automática de eventos, existen múltiples métodos (Sabbione y Velis, 2010). Estos se suelen apoyar en la búsqueda del aumento abrupto de la energía del sismograma o de algún otro atributo.

En líneas generales, los métodos definen primero una función característica que, en los casos presentados, es siempre positiva. Luego cada método analiza la variación de dicha función con distintos criterios. En los métodos de Earle-Shearer y Allen modificado, se utilizan ventanas móviles de distintas longitudes y se evalúa el cociente de la energía contenida en cada una (Earle y Shearer, 1994). En el método de Allen, la propuesta es similar pero estimando las energías mencionadas por aproximaciones numéricas (Allen, 1978). Estos primeros tres son llamados métodos STA/LTA (*Short Term Average/Long Term Average*). Por el otro lado, para el método de Baer-Kradolfer, se utiliza un enfoque estadístico (Baer y Kradolfer, 1987). Finalmente todos los métodos declaran un picado cuando las relaciones definidas superan un umbral seleccionado por el usuario (Sabbione y Velis, 2013)

ALGORITMO DE REDUCCIÓN A UNA COMPONENTE

Se introduce en esta sección el algoritmo de reducción a una componente presentado por Gómez y Velis (Gómez, 2022). La idea fundamental del método consiste en rotar las señales que presentan polarización lineal hacia una única componente. Esto se logra a través de la utilización de una ventana móvil a la que se le otorga la longitud del período aproximado de la señal que se desea rotar. De esta manera, una vez definida la longitud *Nw* de la ventana, los pasos que siguen son:

I. Se calcula la energía dentro de la primera ventana de cada componente (*Eu*, *Ev* y *Ew*). Los valores obtenidos se le atribuyen al punto medio de la misma.

II. Se calcula cómo quedarían las componentes luego de una rotación alrededor de uno de los ejes (eje W por ejemplo) y se re-calcula la energía en cada una. Este cálculo se repite para distintos ángulos hasta obtener aquel que minimiza la energía de una dada componente. El objetivo de este paso es reducir la energía a dos componentes, asumiendo que la componente de mínima energía resultante no contendrá señal de interés.

III. Al finalizar este proceso obtendremos el llamado ángulo óptimo, asociado al punto medio de la ventana, capaz de minimizar la energía en una componente dentro del intervalo considerado.

IV. Se realiza el proceso para la siguiente muestra, moviendo así sucesivamente la ventana por toda la traza.

V. Los ángulos obtenidos son usados para calcular la nueva señal rotada muestra a muestra.

Estos son los pasos fundamentales del procedimiento. El proceso funciona para rotar la energía vinculada a la señal linealmente polarizada con un período similar a la longitud

de la ventana, y se repite para una segunda componente hasta quedarse con una única componente que concentra toda la energía.

En el presente trabajo se proponen algunas modificaciones para lograr un funcionamiento más suave de las funciones de ángulos. Se aplica una ventana de Hann en cada ventana de observación. Esto permite evitar saltos en los ángulos calculados de cada ventana gracias a la reducción del peso en los valores bordes en cada paso, lo cuál se traduce en una mayor estabilidad del método. La mejora en la estabilidad del método obtenida a partir de la ventana de Hann permite el uso de la fórmula cerrada para el cálculo de la señal rotada, evitando así el uso de la técnica de descenso de gradiente.

MÉTODO PROPUESTO

PREPROCESAMIENTO

Se removió la tendencia lineal de las trazas para eliminar la respuesta instrumental. Luego, como la mayoría de los martemotos excitan frecuencias entre 0.1 y 10 Hz, se consideró a la utilización de los datos muestreados a 20 Hz como suficiente para la detección de los eventos. Se filtraron los datos con un filtro pasabandas de frecuencias 2.2 y 2.8 Hz, centrándonos únicamente en el estudio de la familia de eventos de alta frecuencia, por lo que los eventos a considerar fueron los *Very high Frecuency*, *High Frecuency* y los 2.4 Hz, principalmente. Los *Broad-Band* también fueron tenidos en cuenta, pero es de esperarse una menor eficacia en las detecciones debido a que su energía se encuentra distribuida en frecuencias menores.

RECORTE DE SISMOGRAMAS

Debido a la presencia de un elevado ruido ambiental, y previendo por ello una gran cantidad de falsos positivos, se procesaron únicamente trazas los tiempos de calma nocturna.

Las ventanas de tiempo a procesar para cada traza fueron elegidas por inspección visual. Se seleccionaron los momentos de menor energía a partir de analizar la variación de esta durante el día (ver Fig. 3). La delimitación se realizó a través del trazado de rectas contiguas. La energía observada a gran escala se considera relacionada principalmente con los ruidos de origen ambiental, por ser estos de mayor amplitud y duración que los eventos sísmicos y otras señales presentes. Esta característica de las trazas es la que permite el procedimiento de filtrado aplicado.

FILTRADO DE RUIDOS INSTRUMENTALES: *GLITCHES*

El siguiente paso importante en la preparación de las trazas consiste en la atenuación de los ruidos instrumentales conocidos como *glitches*. Como se menciona más arriba, , los *glitches* presentan una amplitud variable que puede tomar valores muy por encima de los esperados para martemotos. Por este motivo, deben ser mitigados para evitar falsos picados en los datos..

A lo largo de la misión *InSight*, el procesamiento de los *glitches* ha dado lugar al desarrollo de múltiples técnicas y enfoques. En términos generales, las estrategias se

basan en una primera etapa de detección y una posterior etapa de eliminación. Para la detección, se busca utilizar un procesamiento muy similar al realizado para la detección automática de eventos, con versiones adaptadas de los distintos algoritmos presentados previamente. Luego, existen diferentes propuestas para su eliminación, todas basadas en la idea de modelar el *glitch* para después ajustar estos modelos a los observados. En general, se realiza un ajuste a partir de un proceso iterativo de mínimos cuadrados que posteriormente es restado a la traza original. Este es un proceso que se repite individualmente para cada *glitch* presente en las trazas.

Las metodologías desarrolladas no están exentas de problemáticas, como pueden ser la remoción errónea de energía en tiempos sin *glitches*, la no completa eliminación de los mismos dejando un residuo o, posiblemente la más significativa, el mal ajuste y funcionamiento para casos de múltiples *glitches* con poca separación entre sí.

APLICACIÓN DE ALGORITMO DE REDUCCIÓN

En este trabajo se propone hacer uso del alto nivel de polarización lineal que los *glitches* presentan, utilizando una versión modificada del algoritmo de reducción a una componente previamente introducido. A modo de ejemplo, se aplica el procedimiento al *glitch* del día 5 de noviembre de 2019 (Figura 2). Para su procesamiento se utiliza una ventana de 30 segundos, período esperable para este tipo de señal, y se busca reducir la componente U, rotando la energía hacia la componente V en primera instancia y hacia la W en segunda.

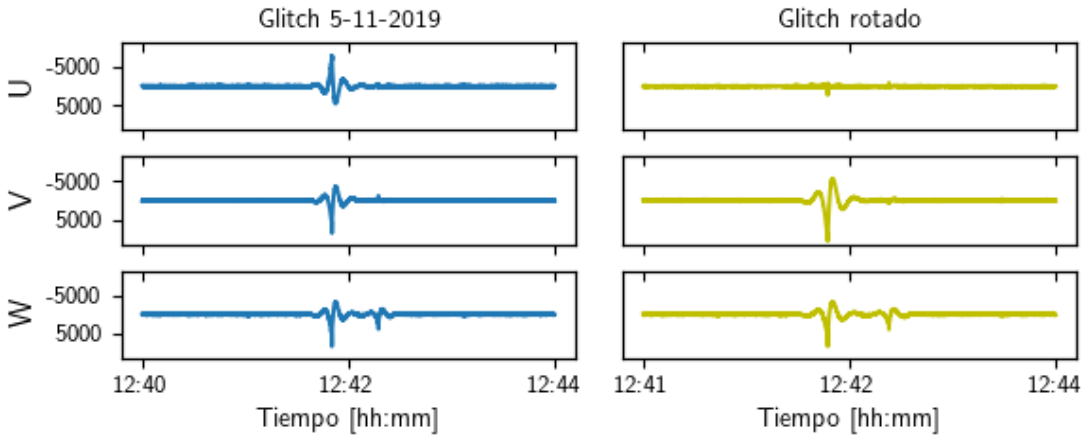


Figura 4. Resultado de la rotación del *glitch* del día 05/11/2019.

Los resultados observados muestran que se reduce significativamente la energía presente en U. La energía residual de los *glitches* se observa como un *spike* residual de pequeña amplitud y período.

Un punto de vital importancia en esta instancia es la baja polarización que presentan los eventos marcianos registrados. A diferencia de lo que se observa en la Tierra, los datos de martemotos no presentan un ángulo de rotación óptimo que permita realizar el proceso de rotación de la energía descrito previamente. Por el contrario, se observan levemente alterados por la aplicación de este proceso. Esto permite utilizar el algoritmo para el filtrado de los *glitches* y obtener así una componente que idealmente contendrá

muy baja energía perteneciente a los ruidos instrumentales y mantendrá inalterada la mayor parte de la energía asociada a los eventos sísmicos.

RESULTADO DE PROCESAMIENTO Y DETECCIONES

Luego de las dos etapas de procesamiento descritas, se obtiene una traza de 4 a 8 horas de duración por día marciano con una marcada reducción en la energía de tipo *spike* correspondiente al ruido instrumental. Esta traza resulta óptima para la aplicación de los métodos de detección automática.

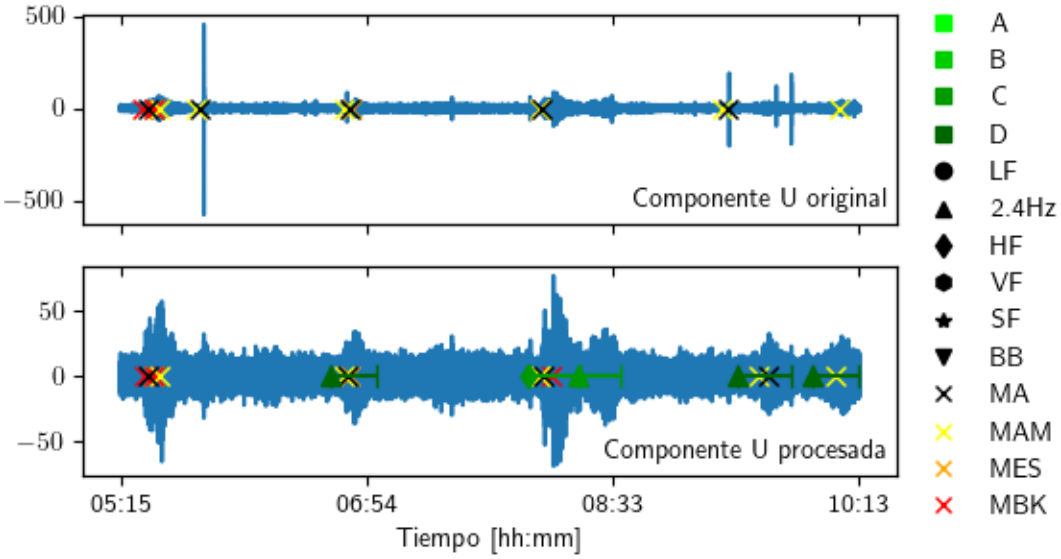


Figura 5. Resultados de algoritmos de detección automática en componente U original (arriba) y procesada (abajo) del día 10/09/2021.

Cada evento fue descrito por el MQS con un tiempo de inicio y un tiempo de finalización. En este período se considera que arriban distintas fases pertenecientes a un mismo origen. De esta manera, se decidió que las detecciones de los distintos métodos sean consideradas como correctas cuando están dentro de uno de los intervalos de energía dados por algún evento declarado. Las longitudes de las ventanas de STA y LTA fueron tomadas iguales a las usadas por el MQS (100 y 1000 s) y se fijó el *threshold* en 2 para los algoritmos de tipo STA/LTA y 0.2 para el método de Baer-Kradolfer. En cuanto a la selección de los días a procesar, se decidió utilizar las trazas correspondientes al segundo semestre de 2021. Esto se basó en la gran cantidad de eventos registrados por el MQS en ese período de 184 días terrestres.

RESULTADOS

Los resultados son presentados en dos secciones. Primero se describen los resultados de los métodos de picado en conjunto, observando así los eventos que logran distinguir los algoritmos. En este punto se busca resaltar la efectividad general del método de procesamiento y, principalmente, el método de atenuación de los *glitches* mediante el algoritmo de rotación. En la segunda sección se comparan los distintos métodos, observando tanto la tasa de picados correctos sobre los erróneos como su efectividad para encontrar los distintos tipos de eventos.

RESULTADOS GENERALES

Tabla II. Cantidades de eventos detectados según su tipo.

Clase	2.4 Hz	HF	VF	BB	Total
Eventos	326	68	9	5	408
Detectados	244	67	7	3	321
Efectividad	74.8 %	98.5 %	77.8 %	60.0 %	78.7 %

Tabla III. Cantidades de eventos detectados según su calidad.

Calidad	A	B	C	D	Total
Eventos	0	40	149	219	408
Detectados	0	39	139	143	321
Efectividad	-	97.5 %	93.3 %	65.3 %	78.7 %

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE PICADO

Tabla IV. Cantidades de eventos detectados por cada método.

Métodos	2.4 Hz	HF	VF	BB	Efectividad	Confiabilidad
MA	181	63	6	3	62.0 %	77.2 %
MAM	215	66	6	2	70.8 %	76.9 %
MES	139	65	5	1	51.5 %	87.5 %
MBK	156	64	6	0	55.4 %	80.0 %
Eventos totales	326	68	9	5	-	-

En líneas generales, se observa una alta efectividad para eventos de tipo *High Frecuency*, y un desempeño inferior para el caso de los *Broad-Band*. En cuanto a los métodos de picado, destacan los de Allen y Allen modificado con una efectividad de detección por encima del resto. El método de Earle-Shearer, por su parte, arroja detecciones con alta confiabilidad, pero con una efectividad apenas superior al 50%.

CONCLUSIONES

Los resultados de la aplicación en los datos de julio a diciembre 2021 fueron expresados en primera instancia de manera general, demostrando la efectividad de todos los métodos en conjunto y, de esta manera, enfocando el análisis en el funcionamiento del método de filtrado propuesto. En esta etapa, se observó una efectividad general superior al 78%, alcanzando detecciones de más de un 98% de los eventos de tipo *High Frecuency*. Los resultados con niveles de detecciones menores se obtuvieron para eventos *Broad-Band*, algo esperable ya que poseen gran parte de su energía por fuera de la banda de paso utilizada. Otro resultado a destacar es la confiabilidad de los picados, donde el valor general fue de casi 80%.

El siguiente paso fue comparar los resultados de cada método en particular, procurando identificar el método de mejor desempeño para los datos marcianos procesados. En este sentido, el método con mayor confiabilidad fue el método de Earle-Shearer (superior al 87%); no obstante fue el de menor porcentaje de detecciones. Por otro lado, los métodos que más se destacaron fueron los de Allen y Allen modificado, ambos con índices de confiabilidad menores pero con una cantidad de eventos detectados muy por encima de los presentados en Earle-Shearer y Baer-Kradolfer. En particular, el método de mejor desempeño es el de Allen modificado, que demostró ser el de mayor efectividad.

REFERENCIAS

Allen, R., 1978, Automatic earthquake recognition and timing from single traces: Bulletin of the Seismological Society of America,, 68, 1521–1532.

Baer, M., y U. Kradolfer, 1987, An automatic phase picker for local and teleseismic events: Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 1437–1445.

Banerdt, W., S. Smrekar, D. Banfield, D. Giardini, et al., 2020, Marsquake catalogue from insight, sols 0–478: Phys. Earth Planet.

Clinton, J., D. Giardini, M. Böse, S. Ceylan, et al., 2018, The marsquake service: securing daily analysis of seis data and building the martian seismicity catalogue for insight: Space Science Reviews.

Clinton, J., D. Giardini, P. Lognonné, B. Banerdt, et al., 2017, Preparing for insight: an invitation to participate in a blind test for martian seismicity: Seismol. Res. Lett., 88.

Earle, P., y P. Shearer, 1994, Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm.: Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 366–376.

Giardini, D., P. Lognonné, W. Banerdt, W. Pike, et al., 2020, The seismicity of mars: Nat. Geosci.

Gómez, A. R., 2022, Detección automática de eventos marcianos: Tesis de Grado,Fac. de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

Gómez, A. R. y Velis, D.R., 2022, Detección automática de eventos sísmicos marcianos con algoritmo de reducción a una componente, Geoacta.

Lognonné, P., W. Banerdt, D. Giardini, W. Pike, et al., 2020, Seis: Insight’s seismic experiment for internal structure of mars: Space Science Reviews.

NASA, P. S., 2023, Mars InSight Mission Web.

Sabbione, J. I. y Velis, D.R., 2010, Authomatic first-breaks picking: New strategies and algorithms, Geophysics, 75(4):V67-V76.

Sabbione, J. I. y Velis, D.R., 2013, A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers: Journal of Applied Geophysics, 99, 42-50.

Scholz, J., R. Widmer-Schnidrig, P. Davis, P. Lognonné, et al., 2020, Detection, analysis and removal of glitches from insight’s seismic data from mars: Earth Space Sci.

Mars Quake Service, I. M., 2023, Mars seismic catalogue, insight mission; v14 2023-04-01.

Smrekar, S. E., P. Lognonné, T. Spohn, W. B. Banerdt, et al., 2019, Pre-mission insights on the interior of mars: Space Science Reviews, 215.



ISBN 978-987-1323-91-3



ices
CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Nodo ARGENTINA

CNEA
Comisión Nacional
de Energía Atómica