

Actas de trabajos completos del

E-ICES 11

11º Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra

4-6 de mayo de 2016, Malargüe, Mendoza

UNCUYO UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
Comisión Nacional de Energía Atómica
ices INTERNATIONAL CENTER FOR EARTH SCIENCES
AGENCIA
FUNDACIÓN WILLIAMS

Actas de trabajos completos del

E-ICES 11



11º Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra

4-6 de Mayo de 2016, Malargüe, Mendoza

Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA
Actas de trabajos completos E-ICES 11; compilado por Martín Pedro Gomez; Dino Filipussi; Alberto Cesar Molina; editado por Martín Pedro Gomez ... [et al.]. - 1a ed . - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2017.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-1323-50-0

1. Ciencias de la Tierra. 2. Política de Ordenamiento Del Territorio. 3. Conservación de Recursos Naturales. I. Gomez, Martín Pedro, comp. II. Filipussi, Dino, comp. III. Molina, Alberto Cesar, comp. IV. Gomez, Martín Pedro, ed.
CDD 550



INSTITUCIONES QUE COLABORARON EN LA REALIZACIÓN DEL E-ICES 11

- Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA, Argentina
- Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina
- Fundación Williams, Argentina
- Embajada de Italia en Argentina
- Consejo Nacional de Investigación (CNR), Italia
- Instituto de Acústica y Sensores “Orso Mario Corvino” (IDASC), Italia
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Italia
- Municipalidad de Malargüe, Argentina

Nota: los trabajos publicados son de exclusiva responsabilidad de sus autores.

COMITÉ ORGANIZADOR DEL E-ICES 11

Tec. María Armeite, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Ing. Nidia Barbero, ICES, Malargüe, Mendoza, Argentina
Sra. Graciela Blanco, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Ing. Ana Rosa Castaño Gañan, ICES, Malargüe, Mendoza, Argentina
Dr. Dino Filipussi, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Ing. Carlos Guzmán, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Lic. Cynthia Hucailuk, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Dra. Isabel López Pumarega, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Abog. Mónica Llansó, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Lic. Emilia Molina, ICES, Mendoza, Argentina
Lic. Miriam Neyra Astudillo, FRD, UTN, Campana, Buenos Aires, Argentina
Tec. Nicolás Núñez, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Bioing. Valeria Ortega Paredes, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina
Dra. Laura Salgán, ICES, Malargüe, Mendoza, Argentina
Dra. Adalgisa Scotti, ICES, Mendoza, Argentina
Lic. Emilce Vaccarino, ICES, Mendoza, Argentina
Ing. Hernán Xargay, ICES, CNEA, Buenos Aires, Argentina

COMITÉ CIENTÍFICO DEL E-ICES 11

Dr. Deyan Draganov, Universidad TU Delft, Delft, Holanda
Dr. Martín Pedro Gómez, ICES, CNEA, San Martín, Argentina
Dra. Isabel López Pumarega, ICES, CNEA, San Martín, Argentina
Dr. Gabriele Paparo, Ex Agregado Científico Italiano, IDASC, Roma, Italia
Dr. Claudio Rafanelli, IDASC, Roma, Italia
Dr. José Ruzzante, ICES, CNEA, San Martín, Argentina
Dra. Adalgisa Scotti, ICES, CNEA, Mendoza, Argentina

MIEMBROS DEL JURADO DEL CONCURSO DE JOVENES INVESTIGADORES

Dr. Diego González, IMM, CNR, Bologna, Italia
Dra. Gabriela Badi, UNLP, La Plata, Argentina
Dra. Adalgisa Scotti, ICES, CNEA, Mendoza, Argentina


E-ICES 11 Thesaurus,
Malargüe, Mendoza.
4-6 mayo de 2016

PRÓLOGO

Estimados Colegas:

Durante el año 2016, entre los días el 4 y el 6 de mayo, el Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra volvió en su onceava edición (E-ICES 11) a la Ciudad de Malargüe, la cual ha sido la sede histórica de los E-ICES desde su inicio. En esta oportunidad, se continúa con la idea de cumplir con el objetivo fundacional de estas reuniones, de realizar una convocatoria realmente multidisciplinaria para investigadores que trabajen o se interesen en las diversas áreas de estudio involucradas en el amplio espectro de las Ciencias de la Tierra.

En esta oportunidad, se sesionó durante tres días completos en el Centro de Convenciones Thesaurus con una asistencia de alrededor de 100 participantes del campo de las ciencias, más una gran participación de la comunidad Malargüina en las Conferencias Plenarias abiertas. Se presentaron 83 trabajos, entre los cuales se incluyen cuatro Conferencias Plenarias, 57 Ponencias Orales y 22 Pósteres, estando algunos de estos trabajos extractados en las presentes Actas.

Las Conferencias Plenarias se dedicaron principalmente al tema "volcanes". En particular, expertos en el tema analizaron los volcanes Copahue, Peteroa y Laguna del Maule desde distintas ópticas. Dada la relevancia de la temática para la comunidad Malargüina, se tuvo una importante presencia local en el auditorio. También se presentaron a la comunidad los resultados del Proyecto de la Red Sísmica "MalARRgüe" (Malargüe Array), la cual estuvo instalada temporalmente en esa región y en el volcán Peteroa durante el año 2012 y cuyos datos siguen estudiándose actualmente.

Durante el E-ICES 11 se continuó con la realización del "Concurso Jóvenes Investigadores". Un Jurado formado por tres investigadores de trayectoria realizó la evaluación de los trabajos escritos y las presentaciones orales de los jóvenes participantes. Los premios del Concurso fueron auspiciados por la Fundación Williams y por el ICES. El Primer Premio le fue otorgado a Darío Rodríguez por el trabajo "MODELADO Y CUANTIFICACIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE SEDIMENTOS SUBMARINOS EN LOS MAGMAS ERUPTADOS EN LA ZONA VOLCÁNICA SUR DE LOS ANDES". El Segundo Premio fue para Natalí Cambruzzi por el trabajo "INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL EN EL ESTUARIO DEL RÍO NEGRO: COMPARACIÓN ENTRE ESCHERICHIA COLI Y ENTEROCOCOS". Ambos trabajos están contenidos en este libro de Actas.

Esperamos junto con todos los Organizadores, que este Encuentro haya cumplido las expectativas tanto en el aspecto científico como en el humano de quienes participaron, y que hayan podido lograr los objetivos planeados para esta reunión, y que hayan aparecido otros nuevos en la interacción con sus colegas.

Quiero expresar mi agradecimiento a quienes sustentan y apoyan desde épocas tempranas la realización de los Encuentros E-ICES, como la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), la Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO), el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva a través de la Agencia Nacional de Promoción Científica, y Tecnológica, la Fundación Williams y la Embajada de Italia en Argentina. Y un especial agradecimiento a la ciudad de Malargüe que tanto hace y ha hecho para que el ICES siga creciendo.

Dr. Martín Pedro Gómez
Director Científico del ICES

ÍNDICE

ESTUDIO DE APTITUD PARA MARICULTURA EN UNA ZONA DE LA BAHIA DE SAN ANTONIO, PROVINCIA DE RIO NEGRO: USO DE INDICADORES MICROBIOLOGICOS, *Abate S., Fernandez V., Rossi F., Ryndycz V., Martinez A., Camacho B., Acosta F., Cambruzzi N.* 1

CONTENIDO DE FENOLES SOLUBLES TOTALES EN EL BIOMONITOR PARMOTREMA AUSTROSINENSE TRASPLANTADO A SAN FERNANDO DEL VALLE DE CATAMARCA, *Acosta W.D., Hernández J.M., Cañas M.S.* 10

ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE PROTEÍNAS SOLUBLES EN EL LIQUEN PARMOTREMA CETRATUM: SU POTENCIAL EMPLEO COMO BIOMARCADOR DEL EFECTO PRODUCIDO POR POLUTANTES URBANOS, *Álvarez V.A., Ocampo A.I., Cañas M.S.* 21

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CARTA SÍNTESIS DE VULNERABILIDAD HUMANA, *Bertotto J., Gascón M., Miranda M.M., Puccio H., Vera R.* 32

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL EN EL ESTUARIO DEL RÍO NEGRO: COMPARACIÓN ENTRE ESCHERICHIA COLI Y ENTEROCOCOS, *Cambruzzi N., Abrameto M., Abate S.* 45

TRATAMIENTO DE DATOS EN LA ESCALA DE ABUNDANCIA/COBERTURA DE BRAUN-BLANQUET PARA EL ORDENAMIENTO DE LA VEGETACIÓN, *Camiz S., Pillar V.D., Torres P.S.* 52

PREDICTING POTENTIAL PLANT COMMUNITY COMPOSITION, *Camiz S., Pillar V.D.* 61

GEOMORPHO: A METHODOLOGY FOR THE COMPLETE GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF A DEM, *Camiz S., Poscolieri M.* 67

PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO Y GESTIÓN DE RESIDUOS EMPETROLADOS GENERADOS EN LA ACTIVIDAD PETROLERA, *Cantero J.A., Gálvez, J.A., López, A.C., Pineda I., Vardaro, S.A.* 76

RELOCALIZACIÓN DE EVENTOS DE FRACTURA REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VOLCÁN PETEROA, ANDES CENTRALES, ARGENTINA-CHILE, *Casas J.A., Badi G. A., Olivera Craig V.H., Manassero M.C., Draganov D., Franco Marín L., Gómez M., Ruigrok E.* 87

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MORFOMÉTRICO PARA IDENTIFICAR VULNERABILIDAD DE RIESGO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RIO SAN JERÓNIMO-CHUMBICHA- CAPAYÁN CATAMARCA, *Cejas G., Niz A.* 102

BIOMONITOREO CON LÍQUENES: ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN IN VIVO DE METALES PESADOS MEDIANTE MICROPIXE, *de la Fournière E.M., Papú O., Cañas M.S., Vega N.A y Debray M.E.* 111

EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y PREVISIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS DEL ÁREA PEDEMONTANA DE LA QUEBRADA Y DIQUE LOS SAUCES - LA RIOJA, ARGENTINA, *del Valle Avila L.S., Niz A.E.* 117

ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE LAS FRACCIONES RECALCITRANTES DE HIDROCARBURO, *Gálvez, J.A.; Cantero, J.A., López A.C.; Vardaro, S.A.* 129

ATENUACIÓN SÍSMICA EN EL SEGMENTO DE SUBDUCCIÓN HORIZONTAL PAMPEANO, Maugeri M., Badi G., Manassero M.C., Casas J.A., Sabbione N., Ibáñez Godoy J. 142

ESS-IM: INCREMENTO EN CALIDAD DE PREDICCIÓN MEDIANTE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EVOLUTIVOS, *Méndez-Garabetti M.A., Bianchini G., Caymes Scutari P., Tardivo M.L.* 154

MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN CORTICAL EN LAS ESTACIONES PERMANENTES CSLO Y UNSJ EN RESPUESTA AL SISMO OCURRIDO EN ILLAPEL (CHILE, 2015), *Navarro J.C., Miranda S.A., Herrada A.H.* 165

MODIFICACIONES DEL PAISAJE NATURAL, VALLE GRANDE, SAN RAFAEL, MENDOZA, *Pucciarelli M.N.* 175

ESTRATEGIAS Y RECURSOS PARA LA EDUCACIÓN FORMAL Y NO FORMAL SOBRE RIESGOS DE DESASTRE LOS CASOS DE MENDOZA Y SAN LUIS, *Robledo S.* 189

MODELADO Y CUANTIFICACIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE SEDIMENTOS SUBMARINOS EN LOS MAGMAS ERUPTADOS EN LA ZONA VOLCÁNICA SUR DE LOS ANDES, *Rodríguez D., Arazi A., Fracchia D., Martí G.V.* 200

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO DE LOS SEDIMENTOS EXTRUIDOS EN ESTRUCTURAS DE SELECCIÓN PRESENTES EN LA ALTA MONTAÑA DEL NW ARGENTINO, *Saccone P.F., Ahumada A. L.* 210

OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DE PREDICCIÓN PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES, Tardivo M.L., Méndez Garabetti M.A., *Caymes Scutari P., Bianchini G.* 220

HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DEL RÍO TECKA-GUALJAINA, CHUBUT, ARGENTINA, *Torrero M.P.* 233

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LOS ÁNGELES DPTO. CAPAYÁN. CATAMARCA, Varela N., Plaza J., Vilches F., Tálamo E., Sánchez M., Palomeque L., Fuentes S. 246

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS EN CUENCAS ANDINAS: REGIONES HOMOGÉNEAS E INTERVALOS DE CONFIANZA, *Vich A.I.J., Lauro C., Otta S.* 256

PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS EN LA ATMOSFERA MEDIA POR EYECCIÓN DE MASA CORONAL, *Zotto E.M., Zossi M.M.* 271

ESTUDIO DE APTITUD PARA MARICULTURA EN UNA ZONA DE LA BAHIA DE SAN ANTONIO, PROVINCIA DE RIO NEGRO: USO DE INDICADORES MICROBIOLOGICOS

Abate S[ab], Fernandez V.[cd], Rossi F.[e], Ryndycz V.[e], Martinez A.[c], Camacho B.[c], Acosta F.[c], Cambruzzi N[ab]

[a]Laboratorio Patagónico de Diagnostico Agroalimentario (Funbapa) - Río Negro, ARGENTINA
[b]Universidad Nac. de Rio Negro–Sede Atlantica–Viedma–Rio Negro, ARGENTINA
[c]Universidad Nacional del Comahue, San Antonio, ARGENTINA
[d]Instituto de Biología Marina Alte Storni; San Antonio, ARGENTINA
[e]Pescadores artesanales de San Antonio Oeste

e-mail: sabate@gmail.com

RESUMEN

La Bahía San Antonio ubicada en el Golfo San Matías, Pcia. Río Negro, fue declarada Reserva Internacional de la Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras, y Reserva Natural. La localidad de San Antonio Oeste, con más de 16.000 habitantes, constituye una de las principales poblaciones costeras en esta bahía.

Diferentes procesos antrópicos constituyen los principales agentes de alteraciones ambientales, como la ocupación territorial y la contaminación concomitante, que atentan contra ambientes únicos y vulnerables como la Bahía de San Antonio. Las aguas residuales domésticas constituyen una de las principales fuentes de contaminación antrópica, que vertidas en el mar pueden tener efectos negativos en salud publica, estéticos y de ecología marina. Cabría agregar el efecto económico cuando condicionan negativamente las actividades productivas como la pesca y maricultura por efectos directos o las consecuencias de las Floraciones Algales Nocivas

En la Bahía de San Antonio existe una zona (40° 47'S; 64° 47'O) con características hidrogeográficas óptimas para realizar actividades de maricultura, que podría estar degradada por contaminación antrópica proveniente de San Antonio Oeste. El objeto de este trabajo fue estudiar el impacto antrópico de la descarga de aguas residuales domésticas en San Antonio Oeste sobre la calidad microbiológica del agua de esta zona de interés, en vista a determinar su aptitud para actividades de pesca, recolección y cultivo comercial conforme parámetros microbiológicos establecidos en el decreto 4238 del SENASA.

Quincenalmente se tomaron muestras submarinas de agua y mejillones, durante los primeros meses del año 2015, que se enviaron al laboratorio de la Funbapa (Red Nacional de Laboratorios del SENASA) donde fueron procesadas antes de las 24 hs de su obtención estimando la concentración de E. coli por el método de fermentación múltiple en tubos (número mas probable = NMP) y la ausencia de Salmonella por métodos estandarizados.

Los resultados obtenidos indican que la zona de estudio es microbiológicamente apta para actividades de maricultura, y justifican continuar los muestreos hasta cumplir los 6 meses ininterrumpidos y realizar los estudios químicos que exige el decreto 4238 del SENASA.

Palabras Clave: contaminación ambiental, Bahía de San Antonio, E. coli, maricultura

INTRODUCCIÓN

En el litoral marítimo de la provincia de Rio Negro no hay registros de actividades exitosas de maricultura a nivel industrial. En el Golfo San Matías se encuentra la Bahía de San Antonio en cuya orilla se emplaza la localidad de San Antonio Oeste con alrededor de 16.000 habitantes. Esta localidad tiene una fuerte tradición en actividades de pesca marina, cuenta con una instalación frigorífica gestionada por el estado provincial con inspección de SENASA permanente, y dos puertos habilitados (uno para transito local y regional y otro para mercado internacional). Cuenta además con el instituto CRIAR, perteneciente al Instituto de Biología Marina y Pesca Almirante Storni (IBMPAS), dedicado a la producción de semillas de bivalvos que constituyen la principal materia prima en actividades de maricultura. En San Antonio también se encuentra una sede de la Universidad del Comahue que junto con el IBMPAS dictan las carreras de Licenciatura en Biología Marina y Técnico en Producción Pesquera y Maricultura, situación que garantiza la dotación de suficientes recursos humanos capacitados para gestionar grupos de trabajo orientados a la explotación sustentable del recurso pesquero. La conjunción de estas condiciones (junto a la necesidad de repoblamiento de bancos naturales agotados, y el interés de sectores productivos de encarar ensayos de cultivo de moluscos), justifica el estudio de diferentes áreas de la Bahía de San Antonio con el objeto de implementar programas de maricultura.

La Bahía de San Antonio resulta interesante para actividades de maricultura, debido a que posee áreas con reparo natural de los vientos y temporales. Se identificó un sector de dicha bahía (40° 47'S; 64° 47'O) que presenta condiciones oceanográficas adecuadas para la implementación de actividades de producción de bivalvos por cultivo, por su profundidad en baja marea y características de dinámica de masas de agua (Foto nº 1).

Para obtener autorización oficial para extracción y producción por cultivo con destino a comercialización federal y/o exportación de bivalvos, se debe demostrar previamente que la zona marina de origen posee aptitudes sanitarias y permite la obtención de alimentos inocuos y de calidad. Para ello se deben realizar estudios de laboratorio evaluando niveles de ciertos indicadores de contaminación establecidos por el Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Agroalimentaria (SENASA) en el Decreto reglamentario Nº 4238 parte 23.24.2.4 modificado según Res. SAGPYA 829 /2006 [1]. En dicho documento el SENASA manifiesta los indicadores a estudiar, los métodos analíticos a aplicar, la frecuencia de muestreo y los límites máximos para cada analito estudiado. Según dicho Decreto, para el caso de los indicadores microbiológicos de contaminación se deben realizar muestreos quincenales durante 6 meses de manera ininterrumpida, de agua e indicadores biológicos de la zona en estudio, para determinar la ausencia de *Salmonella* y demostrar que *E. coli* se encuentra por debajo de límites máximos admisibles.

El objetivo de este trabajo es estudiar las características microbiológicas de una zona de la Bahía de San Antonio con potencial para actividades de maricultura, para conocer si cumple los requisitos establecidos en el Decreto 4238 parte 23.24.2.4 del SENASA y como consecuencia se pudieran comenzar a implementar ensayos de producción de bivalvos mediante cultivo.

MATERIALES Y METODOS

Se identificó una zona de la Bahía de San Antonio (40° 47'S; 64° 47'O) con características oceanográficas apropiadas para la adecuación de prácticas de maricultura (Foto nº 1).

Se tomaron muestras de agua y mejillones de la zona de estudio, con una frecuencia quincenal, en envases estériles, que fueron remitidas cuidando las condiciones de refrigeración al Laboratorio Patagónico de Diagnóstico Agroalimentario de la Funbapa (LR: 0016 de la Red Nacional de Laboratorios del SENASA), de manera que fueran procesadas antes de transcurridas 24 hs desde el momento de su obtención. El muestreo se realizó en concordancia con el Programa de Monitoreo de Calidad Ambiental de las Zonas de Producción de Moluscos de la Provincia de Río Negro, ejecutado por el Instituto de Biología Marina Almirante Storni (IBMPAS).

En el laboratorio, las muestras fueron procesadas según procedimientos estandarizados y armonizados con la Red Nacional de Laboratorios del SENASA.

Para el análisis de *Salmonella* en mejillones se aplicó la norma ISO 6579:2002/Cor1:2004 [2] de la siguiente manera: en condiciones de esterilidad se seleccionaron 25 gr de pulpa de mejillón, que fueron colocados en bolsa estéril y suspendidos en 225 ml de agua de peptona tamponada estéril, obteniendo una dilución 10-1 de la muestra original. La bolsa fue procesada en homogeneizador mecánico estandarizado durante 1 minuto, y llevada a estufa de incubación a 36ºC durante 18 hs. A partir del cultivo de pre-enriquecimiento mencionado, se realizaron subcultivos en los siguientes caldos selectivos: caldo tetrationato según Muller – Kauffmann (MKTTn) y caldo de Rappaport Vassiliadis con soya (RVS), que fueron incubados durante 18 hs. A partir de los caldos selectivos se tomó una ansada en esterilidad, que fue sembrada por agotamiento en superficie sobre dos placas de petri de 10 cm de diámetro cada una, para placas conteniendo los siguientes medios de cultivo: agar xilosa lisina desoxicolato (XLD), agar Hektoen (HK), agar *Salmonella Shigella* (ASS) y agar verde brillante-rojo fenol-lactosa-sacarosa (BPLS). Las placas se incubaron a 36 ºC durante 18 hs. Y se identificaron colonias sospechosas negativas a la degradación de lactosa. Las colonias sospechosas se repicaron en agar nutritivo para ser posteriormente identificadas mediante las pruebas de oxidasa, agar tres azucares (TSI), presencia de enzxima ureasa, presencia de enzima decarboxilasa en agar hierro lisina-decarboxilasa (LIA) y fermentación de la glucose por las pruebas Rojo Metilo y Voges Proskauert (RM-VP). Para los casos sospechosos se contó con una colección de sueros específicos para antígeno "O" total, antígeno "H" (ambas fases), y antígeno Vi. En todos los casos, se inoculó en paralelo una cepa de referencia control positivo (*S. typhimurium* ATCC 14.028) y una cepa control negativo (*E. coli* ATCC 25.922) que contaban con un numero de repiques limitado y conocido.

Para el análisis de *E. coli* en mejillones, se aplicó la norma ISO 16649-3 [3], realizando la prueba de fermentación múltiple en 3 series de 5 tubos cada una. Para ello se realizó una homogeneización previa de la muestra pesando y colocando 25 gr de muestra en bolsa estéril y agregando 225 ml de diluyente; luego de la homogeneización mecánica, se sembraron 10 ml de la suspensión en 5 tubos conteniendo cada uno 10 ml de caldo glutamato con minerales a doble concentración, 1 ml de la suspensión original en 5 tubos conteniendo 5 ml de caldo glutamato con minerales a simple concentración (segunda serie de 5 tubos), y 0,1 ml de la suspensión original en cada uno de 5 tubos conteniendo 5 ml de caldo a simple concentración (tercera serie de 5 tubos). Todos los tubos contaban con campana de Durham. Luego de incubar a 36 ºC durante 18 hs se seleccionaron aquellos tubos sospechosos (cambio de pH y turbidez), registrando aquellos que habían acumulado al menos 1/3 del volumen de la campana de Durham con gas producido durante la fermentación de la lactosa. A partir de estos casos sospechosos se realizaron subcultivos en agar Triptona-bilis-ácido glucurónico (TBX), que se incubaron a 44 ºC durante 18 a 24 hs dentro de una bolsa ziploc para evitar su excesiva deshidratación. Se consideraron tubos positivos aquellos cuyos subcultivos en agar TBX demostraron la formación

de colonias compatibles con E. coli según el tamaño, aspecto de superficie y color turquesa. Contando con el número de tubos confirmados positivos para cada muestra, se interpretó el NMP contrastando con una tabla de NMP estandarizada. En todas las instancias, se utilizó un tubo inoculado con una cepa de *E. coli* (*E. coli* ATCC 25.922) como control positivo

Para el análisis de *E. coli* en agua se homogeneizó correctamente la muestra invirtiendo 20 veces consecutivas el envase, e inmediatamente se tomaron 10 ml que se inocularon en cada uno de 5 tubos conteniendo 10 ml de caldo glutamato con minerales a doble concentración cada uno, 1 ml a 5 tubos conteniendo 5 ml de caldo glutamato con minerales a simple concentración (segunda serie de tubos), y 0,1 ml a cada uno de 5 tubos conteniendo 5 ml de caldo glutamato con minerales a simple concentración (tercera serie de tubos). Todos los tubos contaban con campana Durham.

Luego de incubar a 36 ºC durante 18 hs, se seleccionaron aquellos tubos sospechosos (por cambio de color y desarrollo de turbidez), a partir de los cuales se tomó una ansada que fue inoculada en esterilidad sobre placas de petri conteniendo agar Triptona-bilis-ácido glucurónico (TBX). Las placas se incubaron a 44 ºC durante 18 hs. Se consideraron tubos positivos aquellos cuyos subcultivos en agar TBX demostraron la formación de colonias compatibles con *E. coli* según el tamaño, aspecto de superficie y color. Contando con el número de tubos confirmados positivos para cada muestra, se interpretó el NMP contrastando con una tabla de NMP estandarizada. En todas las instancias, se utilizó un tubo inoculado con una cepa de *E. coli* (*E. coli* ATCC 25.922) como control positivo

Todos los medios de cultivo preparado fueron sometidos a controles de calidad, siguiendo el Manual de Calidad del Laboratorio LR: 0016 elaborado en concordancia con criterios de la norma ISO 17025 [4].



Foto 1. Imagen de la Bahía de San Antonio

1) Zona con aptitud para maricultura según características oceanográficas
2) Planta de tratamiento cloacal y lagunas de decantación de la localidad de San Antonio Oeste.
3) Localidad San Antonio de Oeste

RESULTADOS

En ninguna de las muestras de agua se observó desarrollo de *E. coli* para cualquiera de los 15 tubos inoculados. Considerando que los resultados se informan sobre 100 ml de agua pero el método de NMP para el caso de 3 series de 5 tubos utiliza solo una submuestra de 55,5 ml, el valor de NMP de tabla estandarizada para el caso de ausencia de desarrollo en la totalidad de tubos es < 1,8 [5]. Los resultados obtenidos en análisis de agua se muestran en el gráfico nº 1.

En ninguna de las muestras de mejillón se observó desarrollo de *Salmonella*. En cambio, los valores de NMP de *E.coli* en mejillón fluctuaron entre < 2 y 13 con un 95 % de confianza. Los resultados obtenidos en análisis de *Salmonella* y *E. coli* mejillón se muestran en tabla nº 1.

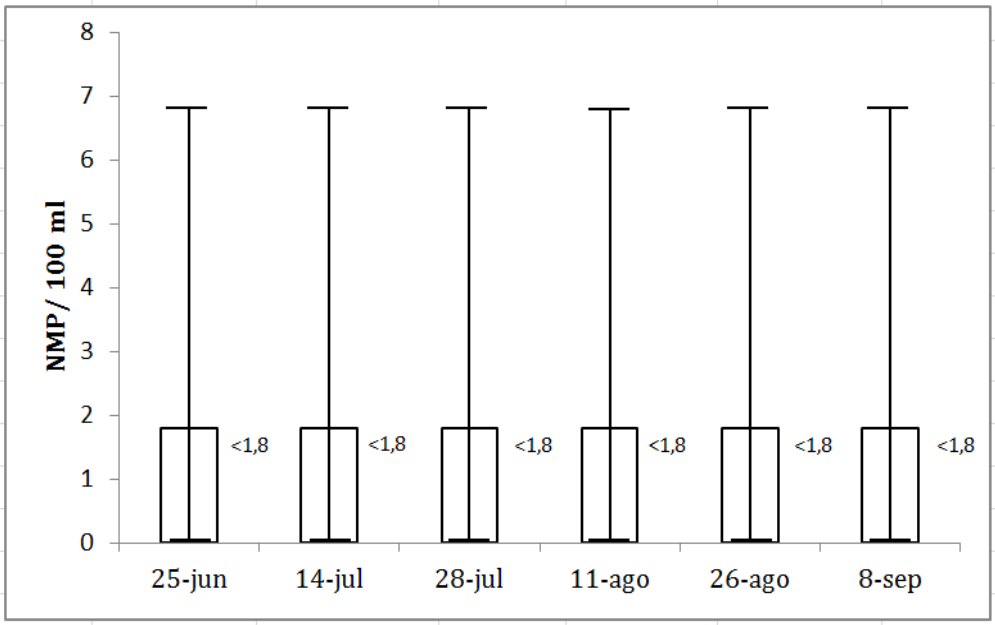


Gráfico 1. NMP de E coli en muestras de agua

Tabla I. NMP de E. coli y análisis de salmonella en pulpa de mejillón.

Fecha	NMP de *E. coli*	Presencia de *Salmonella spp*
30/04/2015	4	Ausente
19/05/2015	<2	Ausente
12/06/2015	13	Ausente
25/06/2015	2	Ausente
14/07/2015	<2	Ausente
29/07/2015	<2	Ausente
11/08/2015	13	Ausente
26/08/2015	<2	Ausente
08/09/2015	2	Ausente

DISCUSIÓN

Aunque aún no se han cumplido los 6 meses de estudio ininterrumpidos según indica el Decreto 4238 del SENASA para comenzar la gestión de habilitación de zona apta para actividades de maricultura (con el objeto de obtener autorización para extracción y venta de producto fresco según ausencia de indicadores microbiológicos de contaminación), los resultados obtenidos hasta el momento son sumamente alentadores. Los valores obtenidos durante 5 meses de estudios microbiológicos para los análisis de *Salmonella*, permiten asumir que la zona podría considerarse tipo A según el Decreto 4238 del SEANSA [1], es decir, la de mayor calidad posible, al demostrarse la ausencia de este importante patógeno. De manera similar ocurre en el caso de *E. coli*, para cuyo indicador la zona también podría considerarse tipo A debido a que los valores de NMP de *E. coli* obtenidos no alcanzan el límite máximo de 230 (los resultados más elevados obtenidos alcanzan a NMP *E. coli* = 13) impuesto por el organismo sanitario nacional. Para el caso de los coliformes fecales, el método normalizado adoptado no permite identificar claramente este valor, por consiguiente se requiere la adopción de diversos métodos para aplicar en paralelo. Actualmente estamos comparando el desempeño del método de NMP utilizando caldo glutamato minerales y subcultivo en agar TBX conforme norma ISO 16649 con el NMP utilizando caldo sulfato de laurilo con fluorocromo MUG conforme Standard Methods [5], en estudios en paralelo. Aunque los resultados de esta comparación no se muestran en este trabajo (que solo remite a la aplicación del método ISO 16649, requerido por la Comunidad Económica Europea como posible comprador de productos derivados de maricultura), los mismos son alentadores ya que en ningún caso los coliformes superan el NMP máximo de 300 dispuesto por el Decreto 4238 del SENASA.

Podría pensarse que los piletones de decantación de la planta de tratamiento cloacal y el vertido del agua tratada cerca de uno de los extremos de la Bahía (punto 2 de la foto nº 1) constituyen un factor de alto impacto ambiental que limitaría el desarrollo potencial de la maricultura en la zona de interés [6, 7]. Sin embargo, en la actualidad gran parte de la población de San Antonio Oeste no ha optado por instalar sus aguas residuales a la red cloacal, sino que mantienen el antiguo sistema de pozo ciego instalado en sus casas de familia: según información proporcionada por el Departamento Provincial de Aguas de Rio Negro, esta situación se debe a que los habitantes prefieren evitar los gastos de instalación de cloacas. Esta situación genera un volumen relativamente reducido de descarga en la planta de tratamientos cloacales, que no representa el equivalente a una población de entre 15 y 20 mil habitantes. Esta situación, sumada al correcto funcionamiento de la planta de tratamientos cloacales durante los últimos años (según consta en los registros de indicadores microbiológicos de su funcionamiento que posee el Laboratorio Patagónico de Diagnóstico Agroalimentario de la Funbapa, donde se realizan dichos análisis aunque sus datos no son publicados por cumplimiento de convenios de confidencialidad), permite asegurar por el momento que, con niveles normales de mareas, no existe evidencia para pensar que la contaminación antrópica de tipo fecal proveniente de la localidad de San Antonio y de su planta de tratamientos cloacales pudiera alcanzar a la zona identificada de interés. Teniendo en cuenta la cercanía relativa del emplazamiento urbano de San Antonio Oeste y de su planta de tratamientos cloacales con la zona costera de un extremo de la Bahía de San Antonio, resulta de trascendencia determinar la ausencia de indicadores de contaminación fecal no solo en la zona identificada de interés sino también en otras áreas de la Bahía con similar potencial productivo. Debieran realizarse estudios correntográficos para determinar si los bajos valores de NMP para *E. coli* o la ausencia de *Salmonella* en la zona de estudio se deben a que el resultante de la planta de tratamientos cloacales no alcanza a impactar en la Bahía de San Antonio, (porque es absorbido por el terreno antes de acceder a la orilla de la Bahía) o bien si los efluentes alcanzarían las aguas de la Bahía pero las corrientes internas serían capaces de dirigir a los mismos hacia afuera de la Bahía, resguardando de alguna manera el extremo opuesto de la misma (véase en la foto, como la planta de tratamientos cloacales se encuentra en ubicación opuesta a la zona identificada de interés para este estudio). Estos estudios permitirían conocer el actual aporte de nutrientes y su potencial relación con el

florecimiento de microalgas de importancia pro su impacto en la inocuidad de bivalvos destinados a consumo humano [9, 10]

A este respecto, es importante destacar que el Decreto 4238 establece que *E. coli* es el indicador de elección para determinar la ausencia de contaminación fecal, a pesar de que en los últimos años y para aguas salinas o con condiciones ambientales extremas se han comenzado a estudiar otros indicadores microbiológicos [11]. Esto se debe a que *E. coli* es un bacilo gran negativo, cuyo hábitat natural es el interior del intestino de animales y el hombre, y que al poseer una reducida pared bacteriana carece de gran capacidad para sobrevivir en ambientes de extrema presión osmótica, como es el agua de mar. Diversos estudios han demostrado que para este tipo de ambientes se cuenta con otros indicadores de contaminación fecal mejor adaptados, como es el caso de las especies que pertenecen al género *Enterococcus* o los Clostridios reductores de sulfito en conjunto o particularmente la especie *C. perfringens* [5, 11, 12]. Independientemente del cumplimiento con los estándares de calidad establecidos en el Decreto 4238, la relativa cercanía con la planta de tratamientos cloacales justifica la incorporación de este tipo de indicadores microbiológicos. Actualmente estamos realizando estudios de contaminación microbiana incorporando al género *Enterococcus*, siguiendo métodos estandarizados por la American Public Health Association [5]. Aunque solo se cuentan con resultados preliminares por el momento, aplicando este tipo de indicadores microbiológicos la zona de estudio demuestra un bajo nivel de impacto antrópico según criterios de la Organización Mundial de la Salud establecidos en su guía sobre aguas costeras [12]. Se considera necesario incorporar el mayor número de indicadores a los establecidos en el Decreto 4238 del SENASA, para contar con la mayor seguridad de que los productos potencialmente obtenidos de actividades de maricultura sean inocuos y de calidad.

Debido a los escasos trabajos de impacto ambiental urbano en la zona de estudio, resulta de gran importancia la información obtenida en este monitoreo [8], ya que permite contar con una línea de base en relación a indicadores microbianos de contaminación fecal. Esta línea de base es fundamental para realizar seguimientos sobre el impacto de los efluentes de la planta de tratamiento cloacal, más aún en el caso que un mayor número de habitantes opten por su adopción como sistema de manejo de sus residuos domiciliarios, o se presenten modificaciones sobre el funcionamiento de dicha planta. De la misma manera, el seguimiento de eventual filtración de los pozos ciegos que actualmente se encuentran funcionales en las viviendas de San Antonio Oeste podrá ser estudiado seriamente una vez que se cuente con una línea de base. La información obtenida también será de utilidad para evaluar el impacto ambiental de emprendimientos de expansión de urbanización, crecimiento del parque industrial e incremento de actividad comercial en la zona portuaria. Estos estudios son cruciales al tratarse la región de una zona protegida y Reserva Natural, y solo podrán realizarse conforme metodologías estandarizadas una vez que se cuente con una línea de base establecida.

Los resultados preliminares expuestos alientan sobre la posibilidad cierta de habilitar la zona de estudio para maricultura conforme el cumplimiento del Decreto 4238. Considerando que los bancos de mejillón fueron sobre explotados y se encuentran actualmente agotados, la adopción de cultivo de mejillones podría tener un efecto ambiental positivo: una gran masa de reproductores emitiendo gametos ayudaría en la recuperación de los bancos naturales de mejillones.

La información obtenida en este trabajo tiene un alto valor social: La pesca artesanal de San Antonio Oeste asiste a la disminución de sus recursos: los bivalvos que generaron inversión y desarrollo en esta localidad varias décadas atrás, fueron sobre explotados indiscriminadamente y hoy la escases del emblemático mejillón impone la dependencia de importación desde Chile. La merluza obtenida localmente ha ido perdiendo el mercado europeo, y su explotación artesanal se hace cada vez menos rentable debido al desproporcional incremento de los costos operativos, (precio local de combustible, repuestos y mantenimiento de embarcaciones, etc.) lo que se ve agravado por los ciclos estacionales de este recurso pesquero. Esta situación lleva a

disponer en estado ocioso una gran capacidad operativa en las familias de pescadores artesanales: lanchas, tripulantes, personal de apoyo, frigorífico pesquero, etc., que en parte podría ocuparse en actividades productivas adicionales a la pesca artesanal actual. En este sentido, el cultivo de mejillón en primera instancia, y eventualmente el cultivo de ostra plana ofrecerían la oportunidad de diversificación productiva a las diferentes familias de pescadores artesanales (mejorando su capacidad financiera, con una producción segura y planificada en el tiempo), coincidiendo además con los lineamientos de sustitución de importaciones (sustituyendo parte de la importación actual de mejillón proveniente de Chile), y en el caso de la otra plana incluso podría ser exportada. Por estas razones, el desarrollo de maricultura en el litoral marítimo de la provincia de Rio Negro estaría en un todo de acuerdo con el Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial Participativo y Federal 2010-202, al permitir aumentar la producción de alimentos y agregar valor en origen para garantizar la soberanía alimentaria e incrementar las ventas externas. Particularmente, la implementación de actividades de maricultura permitirían incrementar el volumen y la diversidad de la producción de alimentos, con posibilidad de agregado de valor en el lugar de origen y fomentando así las economías regionales (al contar en la región con frigoríficos disponibles), particularmente incrementando el número de productores y pequeñas empresas del sector de la pesca.

Por otro lado, y dado que la Universidad Nacional del Comahue dicta las carreras de Licenciatura en Bilogía Marina y de Técnico en Producción Pesquera y Maricultura, la posibilidad cierta de retomar las experiencias de cultivos con un proyecto de maricultura con la participación de Estudiantes y Pescadores (dados los resultados alentadores obtenidos en este estudio) constituirá un factor de alto impacto positivo en estudiantes de la Escuela Superior de Ciencias Marinas de la Universidad del Comahue establecida en San Antonio Oeste, que podrán adquirir conocimientos prácticos en la temática. Considerando que existen otras zonas en el litoral marino patagónico que no han sido abordadas desde el enfoque de la maricultura sustentable, la implementación de proyectos exitosos de maricultura en la Bahía de San Antonio podría replicarse en estos sitios de excelentes características oceanográficas, facilitando la inserción laboral y el desarrollo profesional de los egresados de la Escuela Superior de Ciencias Marinas.

Los resultados obtenidos también importan al desarrollo turístico de la región. La demostración de que algunas zonas de la Bahía de San Antonio cumplen con requisitos expuestos por la OMS para garantizar inocuidad de aguas marinas para uso recreativo [12], a pesar de la relativa cercanía de la planta de tratamientos cloacales, constituye un estímulo para realizar un estudio más completo de la zona, y una base científica para fomentar actividades turísticas, en zona privilegiada dentro del litoral marítimo de nuestro país al poseer las aguas más cálidas con un atractivo color azul.

CONCLUSIONES

Los resultados alientan sobre la posibilidad cierta de una alternativa de solución a una necesidad real de los pescadores artesanales de San Antonio Oeste, que se encuentran expuestos a una limitada actividad comercial de baja rentabilidad (incluso con rentabilidad negativa) como consecuencia de la disminución del recurso pesquero. En el caso que los estudios de contaminantes químicos que desarrollaremos a continuación demuestren que la zona de interés cumple con los requisitos establecidos por el SENASA, se espera su pronta habilitación para maricultura, en cuyo caso el cultivo de moluscos como actividad complementaria a la pesca artesanal permitirá una renta extra con una inversión relativamente baja a los pescadores artesanales. Además, la implementación de emprendimientos acuícolas impulsará el desarrollo de tecnologías tendientes a que la producción de mejillón cubra la demanda de este molusco de consumo tradicional, sustituyendo parcialmente la importación de pulpa, en un todo de acuerdo con el Plan Estratégico Alimentario 2012-2020.
La ausencia de indicadores microbiológicos de contaminación fecal antrópica no garantiza que estén dadas las condiciones para que esta situación se perpetúe en el tiempo, antes que ello

conviene considerar el riesgo que significa la presencia de piletones con aguas residuales en un extremo de la Bahía de San Antonio, y para el caso de implementarse actividades de maricultura evaluar la conveniencia de derivar las aguas tratadas a otra zona, para garantizar la mantención del estatus sanitario del agua de la Bahía.

Los resultados obtenidos justifican concluir el seguimiento microbiológico de la zona de estudio hasta completar los 6 meses establecidos por el SENASA, y comenzar con los estudios de contaminantes químicos.

Este trabajo ha sido subsidiado por la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación, mediante el concurso Manuel Belgrano 2º edición, y está siendo desarrollado por la Universidad Nacional de Rio Negro, la Universidad Nacional del Comahue, al Instituto de Biología Marina y Pesca Almirante Storni y el Laboratorio Patagónico de Diagnóstico Agroalimentario LR: 0016 perteneciente a la Funbapa (Fundación Barrera Zoofitosanitaria Patagónica). Dado el alcance que se pretende lograr con los limitados recursos disponible, constituye un llamativo ejemplo de colaboración sinérgica y eficiencia en el manejo de recursos por cuya razón se considera oportuna su difusión en la mayor medida posible, con el ánimo de generar réplicas en otras unidades académicas de nuestro país.

REFERENCIAS

[1] Decreto 4238: Reglamento de inspección de productos, subproductos y derivados de origen animal, Secretaría de Agricultura y Ganadería, Sanidad Animal, 1968.

[2] Microbiology of food and animal feeding stuffs -- Horizontal method for the detection of *Salmonella* spp. ISO 6579:2002/Cor1:2004.

[3] Microbiology of the food chain -- Horizontal method for the enumeration of beta-glucuronidase-positive *Escherichia coli* -- Part 3: Detection and most probable number technique using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl-ß-D-glucuronide. ISO 16649-3, 2005.

[4] General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO 17025, 2005.

[5] Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, 22nd. ed., Port City Press, Baltimore, Maryland, 2012.

[6] Carbone, M.; Mel, W.; Piccolo, M. Procesos ambientales que afectan la bahía San Antonio y su área de adyacencia (Prov. de Rio Negro). *Huellas* 18, (2014), 132-144.

[7] Carbone, M.; Piccolo, M.; Perillo, G. Zonificación ambiental de la Reserva Natural Bahía San Antonio, Argentina. Aplicación del índice de calidad ambiental. Investigaciones Geográficas 56 (2011),49-67.

[8]Esteves, J.; Solis, M.; Sastre, V.; Santinelli, N.; Gil, Mónica; Commendatore, M.; Gonzalez Raies, C. Informe Técnico: evaluación de la contaminación urbana de San Antonio (Provincia de Rio Negro). ISSN nº 0328-426X, 1996.

[9]Sar, E.A., M.E. Ferrario & B. Reguera. Floraciones algales nocivas en el cono sur americano. Instituto Español de Oceanografía, 2002.

[10]Carreto, J.; Montoya, N.; Carignan, M. Florecimientos de Algas Nocivas, en Atlas de Sensibilidad Ambiental de la Costa y el Mar Argentino. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Jefatura de Gabinete de Ministros, Presidencia de la Nación, 2008.

[11]Savichtcheva, O.; Okabe, S. Alternative indicators of fecal pollution: Relations with pathogens and conventional indicators, current methodologies for direct pathogen monitoring and future application perspectives. Water Research Volume 40, 13, (2006), 2463–2476.

[12]Guidelines for safe recreational water environments. Volume 1: Coastal and fresh waters. Organización Mundial de la Salud. OMS, Geneva, Switzerland, 2003.

CONTENIDO DE FENOLES SOLUBLES TOTALES EN EL BIOMONITOR *PARMOTREMA AUSTROSINENSE* TRASPLANTADO A SAN FERNANDO DEL VALLE DE CATAMARCA

Acosta W.D.[a], *Hernández J.M.* [ab], *Cañas M.S.* [ab]

[a]*Departamento de Formación Básica, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigación y Transferencia de Catamarca, CITCa (CONICET-UNCa)*

e-mail: marthacanas@tecno.unca.edu.ar

RESUMEN

Los líquenes contienen gran cantidad de compuestos fenólicos, los cuales poseen distintas actividades biológicas altamente comprobadas. Sin embargo, poco se conoce respecto de sus posibles roles en la respuesta al estrés ambiental. A los fines de indagar respecto del empleo de fenoles solubles totales (FST) como posible biomarcador del efecto producido por polutantes atmosféricos, se analizó el contenido de FST en Parmotrema austrosinense (Zahlbr.) Hale trasplantada a San Fernando del Valle de Catamarca; correlacionándolo con el contenido de malondialdehído (MDA), compuesto utilizado como parámetro de referencia en esta especie. Para ello, se recolectaron talos liquénicos en un área poco antropizada y se trasplantaron en bolsa a esta área (control) y a diferentes sitios de monitoreo en la ciudad. Luego de tres meses de exposición, se cuantificaron FST. Parte del material liquénico sin trasplantar asimismo se analizó a fines de obtener una muestra basal para el estudio. Los datos se analizaron estadísticamente mediante ANOVA y Test LSD, considerando un $p < 0,05$. El contenido de FST en las muestras urbanas fue significativamente menor respecto de las muestras basal y control; mientras que el contenido de MDA en las mismas fue mayor. Al comparar los sitios urbanos, se observaron contenidos de FST significativamente menores en algunos sitios considerados de baja calidad de aire, siendo el contenido de MDA en los mismos significativamente mayores. Mediante Análisis de Correlación de Pearson, se detectó asociación entre las dos variables ($r = - 0,6722$; $p < 0,001$), lo cual podría indicar una disminución del contenido de FST acompañado de un aumento de estrés oxidativo en el biomonitor. Se infiere, por tanto que el contenido de FST en los talos varía según la calidad del aire a la que P. austrosinense está expuesta y podría emplearse como parámetro en trabajos de monitoreo con esta especie.

Palabras Clave: biomarcador, calidad de aire, estrés oxidativo, liquen

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire puede estudiarse mediante técnicas de biomonitoreo, las cuales consideran la respuesta de un organismo ante determinadas condiciones de polución. Los organismos que permiten cuantificar la calidad del aire y cuyos parámetros cambian en respuesta a la polución se denominan "biomonitores" [1]. Estos pueden clasificarse en "sensitivos" o "acumulativos". Los biomonitores sensitivos pueden ser usados como integradores del estrés causado por contaminantes, y como un sistema de alarma preventivo. Los biomonitores acumulativos tienen habilidad de almacenar contaminantes en sus tejidos y son usados para la medición integrada de las concentraciones de contaminantes en el ambiente [2].

En los bioindicadores/biomonitores sensitivos, las alteraciones metabólicas son usualmente las primeras respuestas cuantificables que permiten detectar rápidamente la presencia de contaminantes, su acción aditiva o sinérgica y el grado de alteración ocasionado sobre el organismo [3]. Las respuestas fisiológicas en un bioindicador han sido propuestas como indicadoras aún de bajos niveles de contaminación, ya que la concentración de algunos polutantes en el aire puede provocar modificaciones permanentes en un bioindicador por efecto acumulativo [4].

Uno de los principales instrumentos de bioindicación utilizados actualmente incluye el empleo de *biomarcadores*, entendiéndose por éstos a cualquier respuesta biológica [5] o parámetros biológicos mensurables a un nivel inferior al de individuo, cuyos cambios indican influencias ambientales en general y la acción de contaminantes en particular, en términos cualitativos, y algunas veces también cuantitativos [6].

Un biomarcador ideal debe ser fácil de medir, y producir un síntoma distintivo que no se confunda con aquéllos causados por otros factores de estrés ambiental. En la práctica, esto es difícil de alcanzar. Por lo tanto, para supervisar con éxito la contaminación ambiental, muchas veces se requiere de más de un biomarcador [7].

Los líquenes son sensibles a la contaminación del aire y por lo tanto son muy apropiados como bioindicadores/biomonitores de calidad ambiental [8, 2, 9]. Esto es debido a su gran dependencia de la atmósfera para la nutrición y a la falta de cutícula cerosa y estomas, lo que permite que muchos contaminantes sean absorbidos por toda la superficie del talo [10].

En general, la exposición a polutantes atmosféricos conduce, entre otros, a la formación de especies reactivas del oxígeno (ERO) al interior de las células. En líquenes, la formación de ERO no ha sido cuantificada directamente, aunque el efecto producido [11, 12] y los mecanismos de defensa que induce [13] pueden ser utilizados como biomarcadores de estrés oxidativo. En este sentido, Gonzalez y Pignata (1994) [8] cuantificaron productos de peroxidación de lípidos de membrana tales como hidroperoxi-dienos conjugados y malondialdehído (MDA) en el liquen *Punctelia subrudecta*. Otros parámetros tales como alteración de la fotosíntesis [14], la integridad de membrana [15] y la actividad de enzimas [13] son también comúnmente analizados.

Los líquenes contienen gran cantidad de compuestos fenólicos, los cuales poseen distintas actividades biológicas altamente comprobadas. Sin embargo, pocas investigaciones se han referido a la capacidad antioxidante que poseen los mismos [16, 17, 18]; así como a los posibles roles [12] y/o cambios en la concentración que puedan surgir como respuesta a polución [7]. Recientemente, Córdoba *et al.* (2012) [19] observaron una disminución en el contenido de ácido lecanórico en *Parmotrema austrosinense* trasplantada a sitios polutos de San Fernando del Valle de Catamarca.

P. austrosinense es un especie sensible a polutantes atmosféricos [20]; y por tal motivo, ha sido utilizada como biomonitora de calidad de aire en Belén [21, 22], en la zona minera del oeste de Catamarca [23, 24] y en el área central de la capital de esta provincia [25, 26]. En el marco de sendos proyectos subsidiados por SECyT-UNCa, desde hace algunos años esta especie viene empleándose como biomonitora de calidad de aire en un área que abarca todo el ejido municipal de Catamarca Capital. Esto representa una importante contribución a la gestión de la calidad del

aire, ya que las mediciones de material particulado y otros tipos de polutantes requieren de equipamiento técnico costoso, no disponible aún en la ciudad.
Como biomarcadores en *P. austrosinense* se ha determinado el contenido de pigmentos fotosintéticos, MDA, azufre, y se ha empleado un índice de polución [19, 27, 28, 29]. No obstante, debido a que a los fines del biomonitoreo es importante conocer la amplitud de la respuesta químico-fisiológica de la especie escogida, es necesario indagar acerca de nuevos parámetros que puedan emplearse como biomarcadores del efecto de polutantes urbanos sobre *P. austrosinense*.
En este trabajo, se propone analizar el contenido de fenoles solubles totales (FST) en talos de *P. austrosinense* trasplantados a sitios con distintos niveles de calidad de aire en Catamarca Capital. Además, dado el carácter antioxidante de estos compuestos demostrado previamente en distintas especies liquénicas [18], se pretende comenzar a indagar acerca del posible empleo del contenido de FST como biomarcador del efecto producido por polutantes urbanos sobre *P. austrosinense*. También, a modo de referencia se analizará, además, el contenido MDA, parámetro empleado de rutina como biomarcador en esta especie.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de estudio

La ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, se encuentra a los 28° 28´ 02" S y 65° 46´ 51" O, a una altura de 545 m s.n.m. Está ubicada en el denominado Valle Central de Catamarca, extensa depresión tectónica delimitada al oeste por la Sierra de Ambato-Manchao y al este por la Sierra de El Alto – Ancasti. Su límite norte está dado por las últimas estribaciones de las Sierras de Fariñango y Graciana, las cuales descienden hasta hundirse en el relleno cuartario un poco al norte y este, respectivamente, de la ciudad capital.
S.F.V. de Catamarca se encuentra ubicada en la Región del Chaco Árido, Provincia Fitogeográfica Chaqueña. El clima es semi-árido, con un promedio de precipitación anual entre los 300 y 360 mm y concentración estival. La temperatura media anual para la ciudad capital es de 20,2 °C [30]. Los vientos predominantes son del NEE y del S y SO.
El Municipio de Catamarca comprende el área urbana (10 % de la superficie departamental) y un área rural, pudiendo distinguirse en el mismo tres grandes unidades territoriales: el sistema serrano, el sistema pedemontano y el sistema fluvial del río del Valle. Cuenta con una población de 160.058 habitantes [31], a la cual deben agregarse los pobladores de los departamentos aledaños (Valle Viejo y Fray Mamerto Esquiú, 28.291 y 11.751 habitantes, respectivamente), con los cuales conforma el "Gran Catamarca".
Estructuralmente, en la ciudad pueden distinguirse las siguientes áreas: a) nodo multifuncional a escala urbano-regional, asentado sobre trazado fundacional; b) área pericentral compacta y consolidada, con geometría paralela al trazado original; c) área intermedia de extensión más reciente, con quiebres en su trazado derivados de accidentes topográficos, hidrográficos y otros (traza antiguo aeropuerto); d) áreas de extensión mediante planes de viviendas (norte y sur), que rompen la compacidad histórica de la planta urbana produciendo grandes vacíos intermedios. Así mismo, en el sector sur de la ciudad se reconoce una zona de asentamiento industrial, que por su localización constituye un sector terminal de la ciudad. En esta zona se localiza, además, la Planta Municipal de Volcado y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos.

Sitios de monitoreo

Los sitios de monitoreo corresponden al proyecto en el que está incluida la investigación propuesta. Los mismos fueron seleccionados considerando la conformación espacial de la

ciudad. Para ello, se trabajó con una imagen satelital georeferenciada y se dividió el área de estudio en cuadrículas de 1 km x 1 km, ver Figura 1. Se seleccionaron 40 sitios (1 por cuadrícula) distribuidos en todo el ejido municipal, algunos de ellos coincidentes con áreas consideradas *a priori* críticas, por sus niveles de tránsito vehicular o por la presencia de otras posibles fuentes de polución atmosférica. Así mismo, se establecieron otros sitios dentro de la ciudad a modo de control para el estudio.

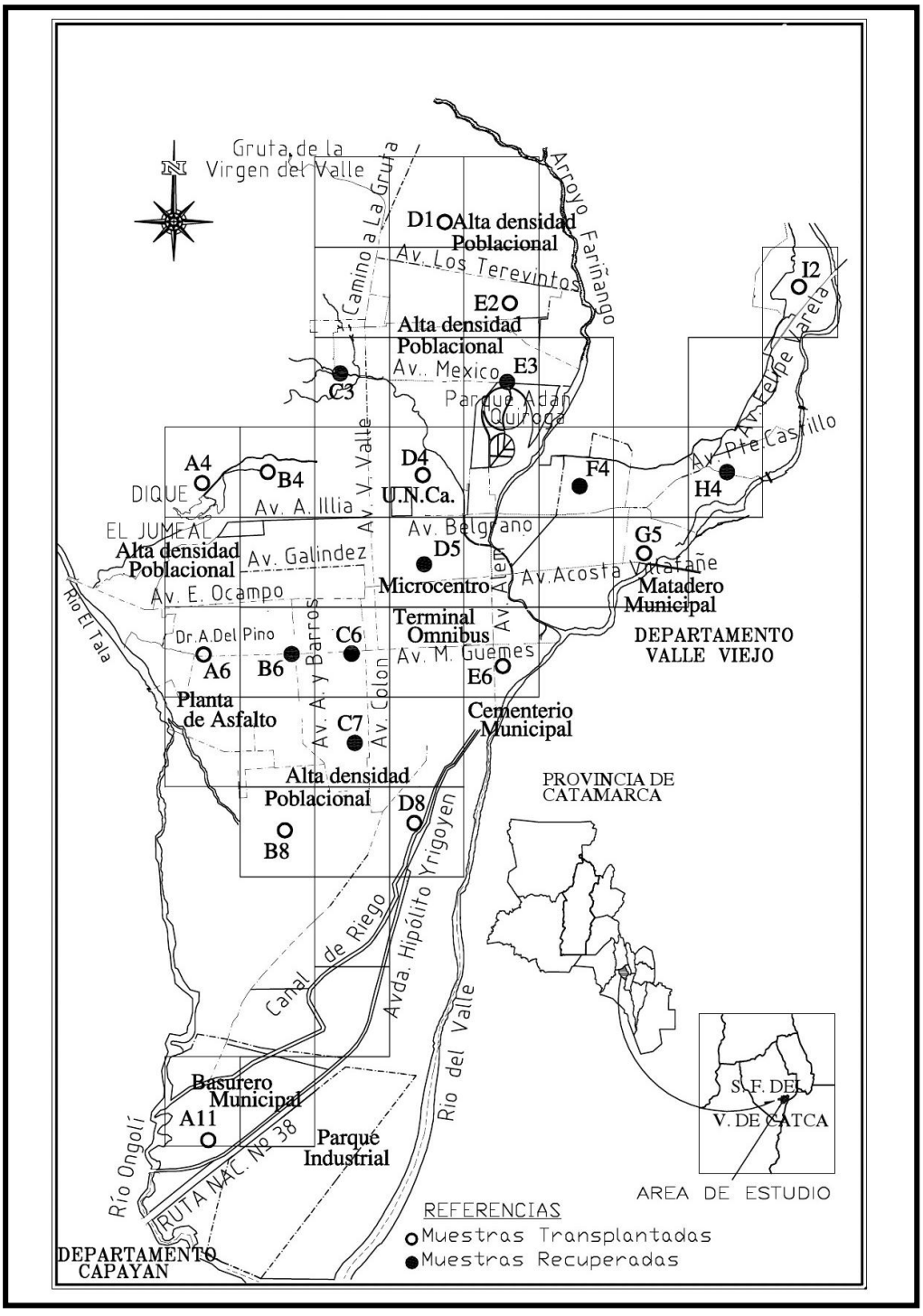


Figura 1. Ubicación de los sitios de monitoreo en la ciudad de S.F.V. de Catamarca. En rojo, los sitios en donde se recuperaron las muestras.

Líquenes y trasplante

En el marco del proyecto en que se desarrolla este plan de trabajo, se recolectaron talos liquénicos de *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale en un lugar considerado de "aire limpio" (Colpes, Catamarca). Los líquenes fueron cuidadosamente limpiados a fin de eliminar material extraño, así como restos de corteza de los arbustos que les sirven de soporte. Posteriormente, los talos fueron colocados en bolsas de malla de nylon (aproximadamente 20 talos por bolsa) y trasplantados sobre postes, a una altura de 3 m sobre el nivel del suelo, en cada sitio de monitoreo. Luego de tres meses de exposición, las muestras fueron recuperadas. En el laboratorio, los líquenes fueron triturados a fin de lograr homogeneidad, y colocados en freezer a - 4º C. A partir de estas muestras se realizarán los análisis químicos propuestos.

Análisis químicos

La concentración de fenoles solubles totales (FST) se analizó mediante la metodología descripta por Kosanić *et al.* (2011) [18], aunque levemente modificada a fines prácticos. A partir de 100 mg de talos secos, se realizó una extracción con 10 mL de etanol al 96 %, las muestras fueron dejadas en reposo en tubos de ensayo a temperatura ambiente y en la oscuridad, agitándolas cada quince minutos. Luego de 2 horas las muestras se centrifugaron a 1.800 rpm durante 15 minutos con el fin de separar el sobrenadante, así, FST en los extractos liquénicos etanólicos se determinaron con reactivo Folin-Ciocalteu de acuerdo al método descripto por Slinkard y Slingleton (1997) [32] utilizando pirocatecol como compuesto estándar. Para ello 0,1 mL del extracto liquénico se mezcló con 2,1 mL de agua destilada y con 0,3 mL de reactivo Folin-Ciocalteu, agitando vigorosamente. Después de tres minutos se agregó 2,5 mL de una solución de Na_2CO_3 saturado y se dejo reposar por el lapso de una hora. La absorbancia se midió a 760 nm contra un blanco (sin muestra etanólica) y la concentración de FST en el extracto se calculó mediante una curva de calibración. Los resultados se expresaron en milimoles de peso equivalente por gramo de peso seco (mmol PE/g P.S).

La cuantificación de malondialdehído (MDA) se realizó mediante un método colorimétrico [33]. Se homogeneizaron 50 mg de material liquénico en 2,5 mL de agua destilada, agregándose luego un volumen igual de TBA (ácido 2-tiobarbitúrico) al 0,5% en solución de TCA (ácido tricloroacético) al 20%. Las muestras se incubaron a 95 °C durante 30 minutos y posteriormente se centrifugaron a 1.800 rpm durante 15 minutos. Se separó el sobrenadante y se leyó la absorbancia específica a 532 nm y la no específica a 600 nm contra blanco. El contenido de MDA se calculó a partir del coeficiente de extinción molar $\varepsilon = 155\ mM^{-1}\ cm^{-1}$ [34]. Los resultados se expresaron en micromoles por gramo de peso seco (μmol/g P.S).

En todos los casos las determinaciones se realizaron a partir de tres submuestras independientes extraídas de cada bolsa liquénica. Parte del material fresco sin trasplantar fue asimismo analizado, a fin de obtener una muestra basal para el estudio. Las mediciones se realizaron con un espectrofotómetro *Labomed UV-2502*.

Análisis estadísticos

Los datos correspondientes a los dos parámetros fisiológicos fueron analizados para sitios distintos mediante ANOVA, Siempre que las diferencias fueron significativas a un $p \leq 0,05$, se aplicó LSD (Mínima Diferencia Significativa) como test a posteriori.

RESULTADOS

Los resultados correspondientes al contenido de FST y MDA analizados en muestras liquénicas de *P. autrosinense*, corresponden a las muestras basales, a 4 muestras trasplantadas al mismo sitio de recolección (muestras control) y a 8 muestras trasplantadas a distintos sitios urbanos en San Fernando del Valle de Catamarca (sitios urbanos). Se observó que el contenido de FST en las muestras urbanas fue significativamente menor respecto de las muestras basales y control; mientras que el contenido de MDA en las mismas fue mayor, ver Figuras 2 y 3.

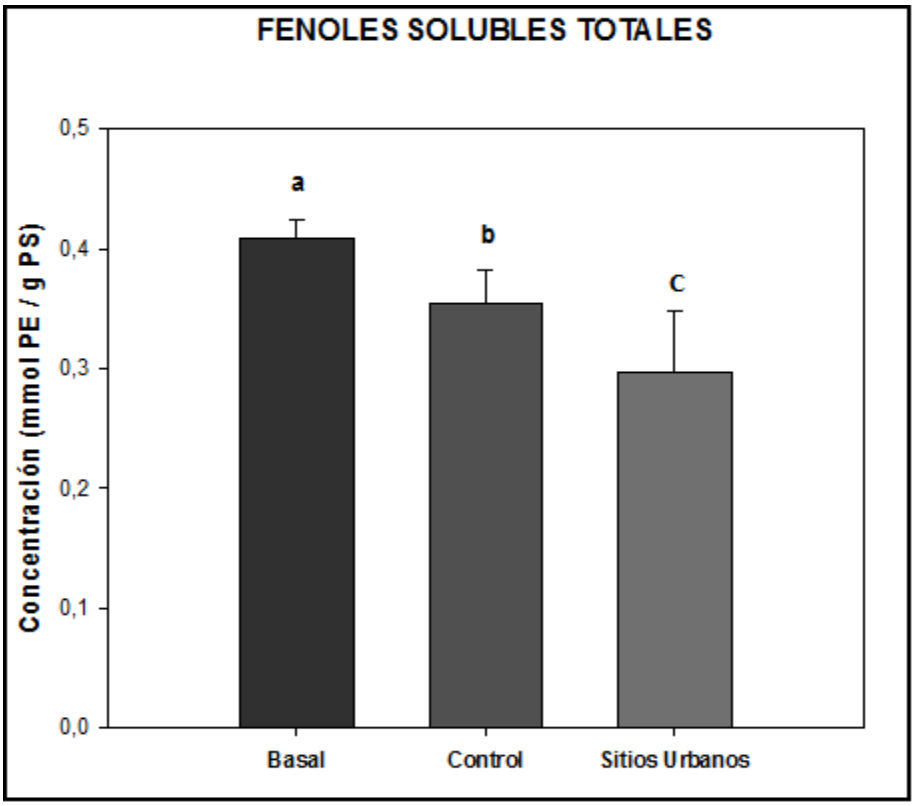


Figura 2. Concentración de fenoles solubles totales en *P. austrosinense* en muestras basales, en muestras trasplantadas al área de colección (control) y a S.F.V. de Catamarca (sitios urbanos).

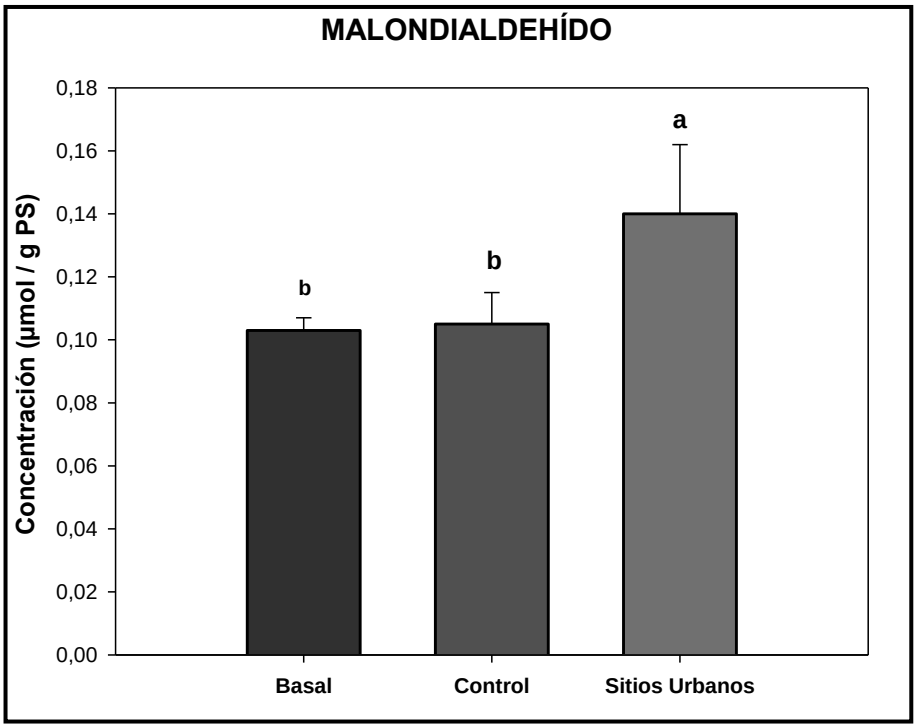


Figura 3. Concentración de malondialdehído en *P. austrosinense* en muestras basales, en muestras trasplantadas al área de colección (control) y a S.F.V. de Catamarca (sitios urbanos). Los valores seguidos de una misma letra no difieren a un p<0,05 (Test LSD).

Por otra parte, y teniendo en cuenta solamente los sitios urbanos, se observaron contenidos de FST significativamente menores en los sitios F4, H4 y D5, considerados de baja calidad de aire. A su vez, el contenido de MDA en estos mismos y en el sitio B6 resultó significativamente mayor, ver Tabla 1.

Por otro lado, con el propósito de conocer acerca del grado de asociación entre las variables cuantificadas, se realizó un análisis de correlación de Pearson. Mediante éste, se detectó una correlación negativa entre las dos variables (r = - 0,6722; p < 0,001).

Tabla I. Concentración de fenoles solubles totales (Media ± D.S. en mmol PE/g P.S.) y malondialdehído (Media ± D.S. en µmol/g P.S.) en *P. austrosinense* trasplantada a 8 sitios en S.F.V. de Catamarca. Los valores seguidos de una misma letra no difieren a un p < 0,05 (Test LSD).

Sitios	FST	MDA
C3	0,32 ± 0,01 a	0,14 ± 0,01 ab
E3	0,34 ± 0,02 a	0,10 ± 0,004 c
F4	0,24 ± 0,04 b	0,14 ± 0,01 ab
H4	0,24 ± 0,06 b	0,16 ± 0,01 a
D5	0,23 ± 0,04 b	0,16 ± 0,02 a
B6	0,32 ± 0,01 a	0,16 ± 0,05 a
C6	0,34 ± 0,01 a	0,12 ± 0,01 bc
C7	0,35 ± 0,004 a	0,11 ± 0,01 c
ANOVA	p < 0,001	p < 0,001

DISCUSIÓN

Sobre la base del contenido de MDA analizado en *P. austrosinense*, comparado entre las muestras basales, las de control y aquellas trasplantadas a la ciudad, el mayor contenido de dicho parámetro en las éstas últimas podría inferir un daño en las membranas celulares del liquen a causa de la presencia de polutantes atmosféricos de naturaleza oxidante [35, 36].
Con respecto a los valores de los dos parámetros analizados entre las muestras de los distintos sitios urbanos, el hecho de que los valores más altos de contenido de MDA pertenezcan a los sitios H4, B6 y D5, los cuales poseen un alto nivel de tránsito vehicular estaría indicando un cierto efecto en el liquen. Esto coincide con lo dicho por González et al. (1995) [37] quienes observaron un incremento en el contenido de MDA en la especie *Ramalina ecklonii* en zonas de alto tránsito en la ciudad de Córdoba. Asimismo, el bajo contenido de FST en dos de estos sitios (H4 y D5) podría indicar una disminución del contenido de FST acompañado de un aumento de estrés oxidativo en el biomonitor.

CONCLUSIONES

Sobre la base del contenido de FST analizado en *P. austrosinense* y la comparación de este con un indicador de daño como lo es MDA, en la misma especie, podría inferirse un cierto grado de afectación a la calidad de aire en San Fernando del Valle de Catamarca especialmente en zonas de alto tránsito, probablemente debido al efecto combinado de polutantes urbanos, al cual el liquen responde para proteger su organismo de los agentes oxidantes, por todo lo anterior MDA sigue siendo un parámetro de referencia a utilizarse como indicador de stress por polución en áreas urbanas. Asimismo, se infiere, por tanto que el contenido de FST en los talos varía según la calidad del aire a la que *P. austrosinense* esté expuesta y podría emplearse como parámetro en trabajos de monitoreo con esta especie. Sin embargo, es necesario profundizar en el análisis de FST en este biomonitor a lo largo de todo un año de exposición a diferentes áreas urbanas y además teniendo en cuenta también otros biomarcadores.

REFERENCIAS

[1] A. Basile, S. Sorbo, G. Aprile, B. Conte, R. Castaldo Cobianchi, *Environ Pollut* **151** (2008), 401-407.

[2] M.E. Conti & G. Cecchetti, Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review, *Environmental Pollution* **114 (**2001), 471–492.

[3] L. R. Shugart, Molecular markers to toxic agents. En: *Ecotoxicology: A Hierarchical Treatment*, M.C. Newman & C.H. Jagoe, eds., CRC-Lewis Publishers, New York, 1996, 135-161.

[3] L. R. Shugart, Molecular markers to toxic agents. En: *Ecotoxicology: A Hierarchical Treatment*, M.C. Newman & C.H. Jagoe, eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, 1996, pág.135-161.

[4] R. Rabe, K. H. Kreeb, Enzyme activities and chlorophyll and protein content in plants as indicators of air pollution, *Environ. Pollut*. **19** (1979), 119-136.

[5] C.A.M. Van Gestel, T. C. Van Brummelen, Incorporation of the biomarker concept in ecotoxicology calls for a redefinition of terms *Ecotoxicology* **5** (1996), 217-225.

[6] B. Markert, J. Oehlmann, M. Roth, General aspects of heavy metal monitoring by plants and animals. En: *Environmental Biomonitoring - Exposure Assessment and Specimen Banking.* K.S.

Subramanian & G.V. Iyengar, eds. ACS Symposium Series 654, American Chemical Society, Washington, DC, 1997, pág. 18-29.
[7] D. Cuny, M.L. Pignata, I. Kranner, R. Beckett, Biomarkers of pollution-induced oxidative stress and membrane damage in lichens. En: *Monitoring with Lichens-Monitoring Lichens*. P.L. Nimis, C. Scheidegger, P. Wolseley, eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002, pág. 97-110.
[8] C.M. González y M.L. Pignata, The influence of air pollution on soluble proteins, chlorophyll degradation, MDA, sulphur and amounts of heavy metals in a transplanted lichen, *Chemistry and Ecology* **9** (1994), 105-113.
[9] M.S. Cañas & M.L. Pignata, Efecto de contaminantes atmosféricos urbano-industriales sobre el liquen *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale, *Ciencia* **1(1)** (2003), 87-100.
[10] L. Bergamaschi, E. Rizzio, G. Giaveri, S. Loppi, M. Gallorini, Comparison between the accumulation capacity of four lichen species transplanted to a urban site, *Environ Pollut* **148 (2)** (2007), 468-476.
[11] D. Cuny, C. Van Haluwyn, P. Shirali, The concept of biomarker in lichenology - Application in bioindication survey. En: *Progress and Problems in Lichenology at the turn of the millennium. Reports of the Fourth IAL Symposium*, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2000, pag 115.
[12] N. Valencia-Islas, A. Zambrano, J.L. Rojas, Ozone reactivity and free radical scavenging behavior of phenolic secondary metabolites in lichens exposed to chronic oxidant air pollution from Mexico City, *J. Chem. Ecol* **33** (2007), 1619-1634.
[13] L. Silberstein, B.Z. Siegel, S.M. Siegel, A. Mukhtar, M. Galun, Comparative studies ON *Xanthoria parietina*, a pollution-resistant lichen, and Ramalina duriaei, a sensitive species. II. Evaluation of possible air pollution-protection mechanisms, *Lichenologist* **28** (1996 b), 367-383.
[14] S. Déruelle, P.J.X. Petit, Preliminary studies on the net photosynthesis and respiration responses of some lichens to automobile pollution. C*ryptogamie, Bryol. Lichénol* **4** (1983), 269-278.
[15] S. Tarhanen, T. Holopainen, J. Poikolainen, J. Oksanen, Effect of industrial emissions on membrane permeability of epiphytic lichens in northern Finland and the Kola Peninsula industrial areas, *Water, Air and Soil Poll* **88** (1996), 189-201.
[16] B. Ranković, D. Ranković, M. Kosanić, D. Marić, Antioxidant and antimicrobial properties of the lichen *Anaptychy ciliaris*, *Nephroma parile*, *Ochrolechia tartarea* and *Parmelia centrifuga*, *Cent Eur J Biol* **5** (2010 a), 649-655.
[17] J.A. Silva, R.R. Bomfim; S. Estevam Cdos, A.R. Antoniolli, A.A. Araújo, S.M. Thomazzi, Pharmacological properties of lichen Cladonia clathrata, *Pharm Biol* **48** (2010), 745-752.
[18] M. Kosanić, B. Ranković, J. Vukojević, Antioxidant properties of some lichen species, *J Food Sci Technol* **48(5)** (2011), 584-590.
[19] S.K. Córdoba, A.I. Ocampo, R.G. Moyano, M.S. Cañas, Análisis del contenido de ácido lecanórico y pigmentos fotosintéticos en líquenes trasplantados a San Fernando del Valle de Catamarca, *Producción Científica de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas-III*. ECU- UNCa., S.F.V. de Catamarca, 2012, pág. 87-94.
[20] M.S. Cañas, Respuesta química de tres especies liquénicas a contaminación atmosférica. Selección de parámetros para bioindicación, Tesis Doctoral. Univ. Nac. de Córdoba, 2001.
[21] L.I. Palomeque, C.B. Mohaded Aybar, A.I. Ocampo, P. Severini & M.S. Cañas, Evaluación de la calidad de aire en un sector del departamento Belén (Catamarca) mediante el

empleo de *Parmotrema austrosinense* como biomonitora. En: *Investigaciones Docentes en Ingeniería*, Editorial Sarquís, S.F.V. de Catamarca, 2006, pág. 189-192.
[22] L.I. Palomeque, R.C. Jasan, A.I. Ocampo, C.B. Mohaded Aybar, G.C. Fuentes, R.G. Moyano, R.R. Plá & M.S. Cañas, Análisis preliminar de las respuestas química y fisiológica de *P. austrosinense* trasplantada a un área del oeste catamarqueño. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, N. Ortiz de Adler, A.G. Elías, T. Heredia, eds., Editorial ECO FACET UNT, S.M. de Tucumán, Vol. II., 2007, pag. VI-41-46.
[23] C.B. Mohaded Aybar, A.I. Ocampo, R.L. Villegas & M.S. Cañas, Comparación de la respuesta química de dos especies liquénicas trasplantadas a la región minera del oeste de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial Científica Universitaria de la Universidad Nacional de Catamarca (ECU UNCa), S.F.V. de Catamarca, 2008, Tomo I, III-71-75.
[24] C.B. Mohaded Aybar, A.I. Ocampo, L.I. Palomeque & M.S. Cañas, Determinación del contenido de azufre y un índice de polución en dos especies liquénicas trasplantadas a la región minera del oeste de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial EUNSa – EdiUNJu, Salta, 2010, pág. 201-205.
[25] A.I. Ocampo, R.C. Jasan, C.B. Mohaded Aybar, R.G. Moyano, S.K. Córdoba, R.R. Plá & M.S. Cañas, Relación entre el nivel de tránsito vehicular y el contenido de elementos traza en líquenes trasplantados al área central de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial Científica Universitaria UNCa, S.F.V. de Catamarca, 2011a, Tomo 1, 557-564.
[26] A.I. Ocampo, C.B. Mohaded Aybar, R.G. Moyano, V.A. Álvarez, W.D. Acosta & M.S. Cañas, Análisis de la respuesta fisiológica de *Parmotrema austrosinense* trasplantada al área central de San Fernando del Valle de Catamarca, *Actas del 7º Encuentro del "International Center of Earth Sciences" (E-ICES 7)*, Malargüe, 2011 b., Acta de Resúmenes, pág. 64.
[27] A.I. Ocampo, J.M. Hernández, V.A. Álvarez, R.J Coronel, W.D. Acosta, R.G. Moyano, M.S. Cañas, Contenido de pigmentos fotosintéticos en el liquen *Parmotrema austrosinense* trasplantado a la ciudad Capital y al área de colección (Los Varela, Ambato) en Catamarca, Argentina. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, 2013 a, Formato digital. ISSN 1853-7871.
[28] A.I. Ocampo, R.G. Moyano, R.J. Coronel, W.D. Acosta, L.J.M. Segura, M.S. Cañas, Evaluación de la calidad del aire de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca mediante el empleo de *Parmotrema austrosinense* como biomonitor. En: Actas del 9º Encuentro del "International Center of Earth Sciences", E-ICES 9. Malargüe, 2013b, pág. 264-273.
[29] A.I. Ocampo, C.B. Mohaded Aybar, R.G. Moyano, V.A. Álvarez, W.D. Acosta, M.S. Cañas, *Parmotrema austrosinense* (Ascomycota liquenizado) como bioindicador sensitivo en el área central de San Fernando del Valle de Catamarca, En: *Producción Científica de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas-IV*. ECU-UNCa. 2013c, pág. 79-85.
[30] M.C. Morlans, B.A. Guichón, Reconocimiento Ecológico de la Provincia de Catamarca I: Valle de Catamarca. Vegetación y Fisiografía, *Revista de Ciencia y Técnica UNCa* **1** (1995), pág. 15-50.
[31] INDEC, Censo Nacional de Población, hogares y viviendas 2010, Serie A, Número 1, 2010.
[32] K. Slinkard, V.L. Slingleton, Total phenol analyses: Automation and Comparison with Manual Methods *Am J Enol Vitic* **28** (1977), 49-55.

[33] R.L. Heath, L. Packer, Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation, *Arch Biochem Biophys* **125** (1968), 189-198.
[34] H. Kosugi, T. Kojima, K. Kikugawa, Thiobarbituric acid-reactive substances from peroxidized lipids, *Lipids* **24** (1989) 873-881.
[35] D.B Menzel, The role of free radicals in the toxicity of air pollutants (nitrogen oxides and ozone). En: *Free radicals in biology*, W.A. Pryor, Acad. Press, New York, 1976, Vol. II, 181-203.
[36] M.A. Mehelman & C. Borek, Toxicity and biochemical mechanisms of ozone, *Environm. Res.***42** (1987), 36-53.
[37] C.M. González, S.S. Casanovas & M.L. Pignata, Biomonitoring of air pollution from traffic and industries employing *Ramalina ecklonii* (Spreng.) Mey. and Flott., in Córdoba, Argentina, *Environmental Pollution* **91** (1996), 269-277.

ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE PROTEÍNAS SOLUBLES EN EL LIQUEN *PARMOTREMA CETRATUM*: SU POTENCIAL EMPLEO COMO BIOMARCADOR DEL EFECTO PRODUCIDO POR POLUTANTES URBANOS

Álvarez V.A.[a], *Ocampo A.I.*[a], *Cañas M.S.*[ab]

[a]*Departamento de Formación Básica, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigación y Transferencia de Catamarca, CITCa (CONICET-UNCa)*

e-mail: marthacanas@tecno.unca.edu.ar

RESUMEN

Los líquenes son utilizados como indicadores biológicos para estimar la polución atmosférica debido a su sensibilidad a condiciones ambientales, las cuales originan cambios mensurables en algunos de sus metabolitos específicos. En este trabajo se analizó el contenido de proteínas solubles en Parmotrema cetratum (Ach.) Hale trasplantado a diferentes sitios de San Fernando del Valle de Catamarca; a los fines de evaluar la capacidad de este parámetro como biomarcador de respuesta a polución atmosférica urbana en esta especie. Para ello, talos liquénicos se recolectaron en un área poco antropizada y se trasplantaron en bolsa a sitios con distintas características ambientales en la ciudad. Luego de 3 meses de exposición se cuantificó el contenido de proteínas solubles; como así también el contenido de pigmentos fotosintéticos, que son compuestos empleados de rutina como biomarcadores en ésta y otras especies liquénicas. Parte del material recolectado sin trasplantar fue así mismo analizado, a los fines de obtener un nivel basal para el estudio. No se observaron diferencias significativas entre estas muestras basales y los talos trasplantados a sitios urbanos para ninguno de los parámetros analizados; lo cual podría sugerir un bajo nivel de estrés en P. cetratum al ser expuesta a condiciones diferentes al de su ambiente natural. Al comparar entre sitios urbanos, se observó un contenido de proteínas significativamente inferior en sitios considerados a priori de baja calidad de aire. En trabajos previos, en estos sitios se detectaron síntomas de stress en líquenes, utilizando otros parámetros como biomarcadores. No obstante las diferencias inter-sitios observadas, el contenido de proteínas solubles de los talos no correlacionó con el contenido de pigmentos fotosintéticos. Por tal motivo, para establecer el potencial como biomarcador de las proteínas solubles en P. cetratum, será necesario analizar este parámetro conjuntamente con otros compuestos marcadores del efecto producido por polutantes atmosféricos sobre líquenes.

Palabras Clave: biomonitor, calidad de aire, San Fernando del Valle de Catamarca

INTRODUCCION

La evaluación de la calidad atmosférica mediante el empleo de organismos se denomina bioindicación o biomonitoreo. Un bioindicador, es un organismo que reacciona a una dinámica ambiental específica mediante cambios observables y cuantificables. Midiendo estos cambios, como respuesta a una forma especial de polución, pueden extraerse conclusiones sobre la fuente de emisión, y posiblemente su intensidad; así como de la calidad global de ese ambiente [1].

Los líquenes son los bioindicadores más ampliamente utilizados para la evaluación de la calidad de aire [2-5], debido a su sensibilidad a condiciones ambientales, las cuales originan cambios mensurables en sus componentes específicos [6-7].

En función de su respuesta a la contaminación, los líquenes pueden clasificarse en: (I) bioindicadores o biomonitores de acumulación, aquéllos que se adaptan mediante su capacidad para acumular contaminantes; (II) bioindicadores o biomonitores de respuesta, aquéllos que responden mediante

alteraciones en su comportamiento (composición de especies, abundancia, morfología, fisiología [8]. A estos últimos, los denominan biomonitores sensitivos [9], los cuales son utilizados como integradores del estrés causado por los contaminantes y como un sistema de alarma preventivo.

En los bioindicadores/biomonitores sensitivos, las alteraciones metabólicas son usualmente las primeras respuestas cuantificables que permiten detectar rápidamente la presencia de contaminantes, su acción aditiva o sinérgica y el grado de disrupción ocasionado sobre el organismo [10]. Las respuestas fisiológicas han sido propuestas como indicadoras aún de bajos niveles de contaminación, ya que si bien la concentración de algunos contaminantes en el aire puede no ser lo suficientemente elevada como para ser detectada por métodos convencionales, puede provocar modificaciones permanentes en un bioindicador por efecto acumulativo [11]. En este sentido, se aplica el término biomarcador, a cualquier respuesta biológica [12] o parámetros biológicos mensurables a un nivel inferior al de individuo, cuyos cambios indican influencias ambientales en general y la acción de contaminantes en particular, en términos cualitativos, y algunas veces también cuantitativos [13].

La especie *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale, ha sido utilizada por nuestro grupo de investigación como biomonitora de calidad de aire en una extensa área del departamento Belén, Catamarca [14-16], en la zona minera del Complejo Volcánico Farallón Negro en el oeste de Catamarca [17-18] y en la capital de esta provincia [19-21]. Hemos realizado, además, estudios preliminares de otra especie de liquen como bioindicadora de calidad de aire en sitios mineros y urbanos [22-23]. Sin embargo, diferentes especies muestran distinta sensibilidad a contaminantes atmosféricos específicos [24]. De aquí que el empleo de líquenes como bioindicadores esté sujeto a la elección de aquellas especies adecuadas por su grado de sensibilidad, aunque frecuentemente el factor determinante es la abundancia y disponibilidad de las mismas dentro del área de estudio. La especie *Parmotrema cetratum* es abundante en una región poco antropizada de la provincia de Catamarca; por tanto su estudio como potencial bioindicador es de fundamental importancia para la investigación de calidad atmosférica.

A los fines del biomonitoreo, es importante conocer la amplitud de la respuesta químico-fisiológica de la especie escogida, entendiéndose por ésta la cantidad de parámetros que varían por efecto de contaminantes atmosféricos, lo cual da cuentas del grado de disrupción sufrido a nivel del metabolismo liquénico. En tal sentido, una variedad de parámetros han sido usados para medir los efectos subletales de polutantes sobre líquenes. Entre éstos, el contenido de clorofilas [25-29] y el índice de feofitinización [30,25] han mostrado ser buenos indicadores de estrés liquénico causado por polutantes atmosféricos.

En estudios preliminares *de P. cetratum* se observó una cierta respuesta fisiológica luego de estar expuesta a distintas condiciones ambientales en la ciudad de Catamarca. La evidencia más clara fue con relación al contenido de pigmentos y del cociente Clor. *b*/Clor. *a.* Se detectaron concentraciones superiores de pigmentos y malondialdehído (MDA) en sitios muy transitados en la ciudad y altos valores del cociente antes mencionado; esto estaría indicando un cierto grado de afectación de los talos expuestos a sitios considerados de baja calidad atmosférica [31].

El contenido de proteínas ha sido así mismo empleado como un parámetro de respuesta a polutantes en líquenes [32-34], aunque en la especie *P. cetratum* utilizada en el presente trabajo no ha sido aún cuantificado. En líquenes, tanto las proteínas estructurales como enzimáticas pueden sufrir detrimento debido a la interacción con el SO_2 [35-36] u otros polutantes atmosféricos [37-38], pudiendo ello afectar el intercambio de nutrientes entre los simbiontes liquénicos y alterar el delicado balance de la asociación [36].

La reducción en el contenido de proteínas podría deberse a una disminución en la fotosíntesis y/o en la ruptura de proteínas existente; o a la reducción de la síntesis *de novo* [39]. Así, se reportó una reducción de la biosíntesis de proteínas en el liquen *Evernia mesomorpha* fumigada con relativamente bajas concentraciones de SO_2 [35]. Se observó una correlación negativa del contenido de Cd y proteínas en dos especies de líquenes empleados como biomonitores de polución atmosférica [37]. Sin embargo, se estableció que el contenido de proteínas en talos de *Parmelia sulcata* no difirió significativamente en relación con los distintos niveles de polución de cada sitio en el que fue colectada [40].

En esta investigación se analizó el contenido de proteínas solubles en *P.cetratum (Ach.)* Hale trasplantada a la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca; analizando su comportamiento conjuntamente con el de pigmentos fotosintéticos, compuestos éstos ya validados como biomarcadores en esta especie. Con ello, se evaluó la capacidad de este parámetro como biomarcador de respuesta; a los fines de contribuir al estudio de calidad de aire en nuestra ciudad.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de estudio

San Fernando del Valle de Catamarca está ubicada en el denominado Valle Central de Catamarca, extensa depresión tectónica delimitada al oeste por la Sierra de Ambato-Manchao y al este por la Sierra de El Alto – Ancasti. Su límite norte está dado por las últimas estribaciones de las Sierras de Fariñango y Graciana, las cuales descienden hasta hundirse en el relleno cuaternario un poco al norte y este, respectivamente, de la ciudad capital.
S.F.V. de Catamarca se encuentra ubicada en la Región del Chaco Árido, Provincia Fitogeográfica Chaqueña. El clima es semi-árido, con un promedio de precipitación anual entre los 300 y 360 mm y concentración estival. La temperatura media anual para la ciudad capital es de 20,2 °C [41]. Los vientos predominantes son del NEE y del S y SW.
El Municipio de Catamarca comprende el área urbana (10 % de la superficie departamental) y un área rural, pudiendo distinguirse en el mismo tres grandes unidades territoriales: el sistema serrano, el sistema pedemontano y el sistema fluvial del Río del Valle. Cuenta con una población de 160.058 habitantes [42], a la cual deben agregarse los pobladores de los departamentos aledaños (Valle Viejo y Fray Mamerto Esquiú, 28.291 y 11.751 habitantes, respectivamente), con los cuales conforma el "Gran Catamarca".
Estructuralmente, en la ciudad pueden distinguirse las siguientes áreas: a) nodo multifuncional a escala urbano-regional, asentado sobre trazado fundacional; b) área pericentral compacta y consolidada, con geometría paralela al trazado original; c) área intermedia de extensión más reciente, con quiebres en su trazado derivados de accidentes topográficos, hidrográficos y otros (traza antiguo aeropuerto); d) áreas de extensión mediante planes de viviendas (norte y sur), que rompen la compacidad histórica de la planta urbana produciendo grandes vacíos intermedios. Así mismo, en el sector sur de la ciudad se reconoce una zona de asentamiento industrial, que por su localización constituye un sector terminal de la ciudad. En esta zona se localiza, además, la Planta Municipal de Volcado y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos.

Sitios de monitoreo

Los sitios de monitoreo corresponden al proyecto en el que está incluida la investigación propuesta. Los mismos fueron seleccionados considerando la conformación espacial de la ciudad. Para ello, se trabajó con una imagen satelital georeferenciada y se dividió el área de estudio en cuadrículas de 1 km x 1 km (ver Figura 1). Se seleccionaron 40 sitios (1 por cuadrícula) distribuidos en todo el ejido municipal, algunos de ellos coincidentes con áreas consideradas *a priori* críticas, por sus niveles de tránsito vehicular o por la presencia de otras posibles fuentes de polución atmosférica.

Líquenes y transplante

Se colectaron talos liquénicos de *Parmotrema cetratum (Ach.)*) Hale en un lugar considerado de "aire limpio" (Miraflores, Catamarca). Los líquenes fueron cuidadosamente limpiados a fin de eliminar material extraño, así como restos de corteza de los arbustos que les sirven de soporte. Posteriormente, los talos fueron colocados en bolsas de malla de nylon (aproximadamente 20 talos por bolsa) y trasplantados sobre postes, a una altura de 3 msnm., en los sitios de monitoreo (sitios urbanos). Parte del material recolectado sin trasplantar fue separado, a los fines de obtener un nivel basal (basal) para el estudio. Luego de tres meses de exposición, 18 muestras fueron recuperadas (n=18). En el laboratorio, los líquenes fueron triturados a fin de lograr homogeneidad, y colocados en freezer a - 4º C. A partir de estas muestras se realizarán los análisis químicos propuestos.

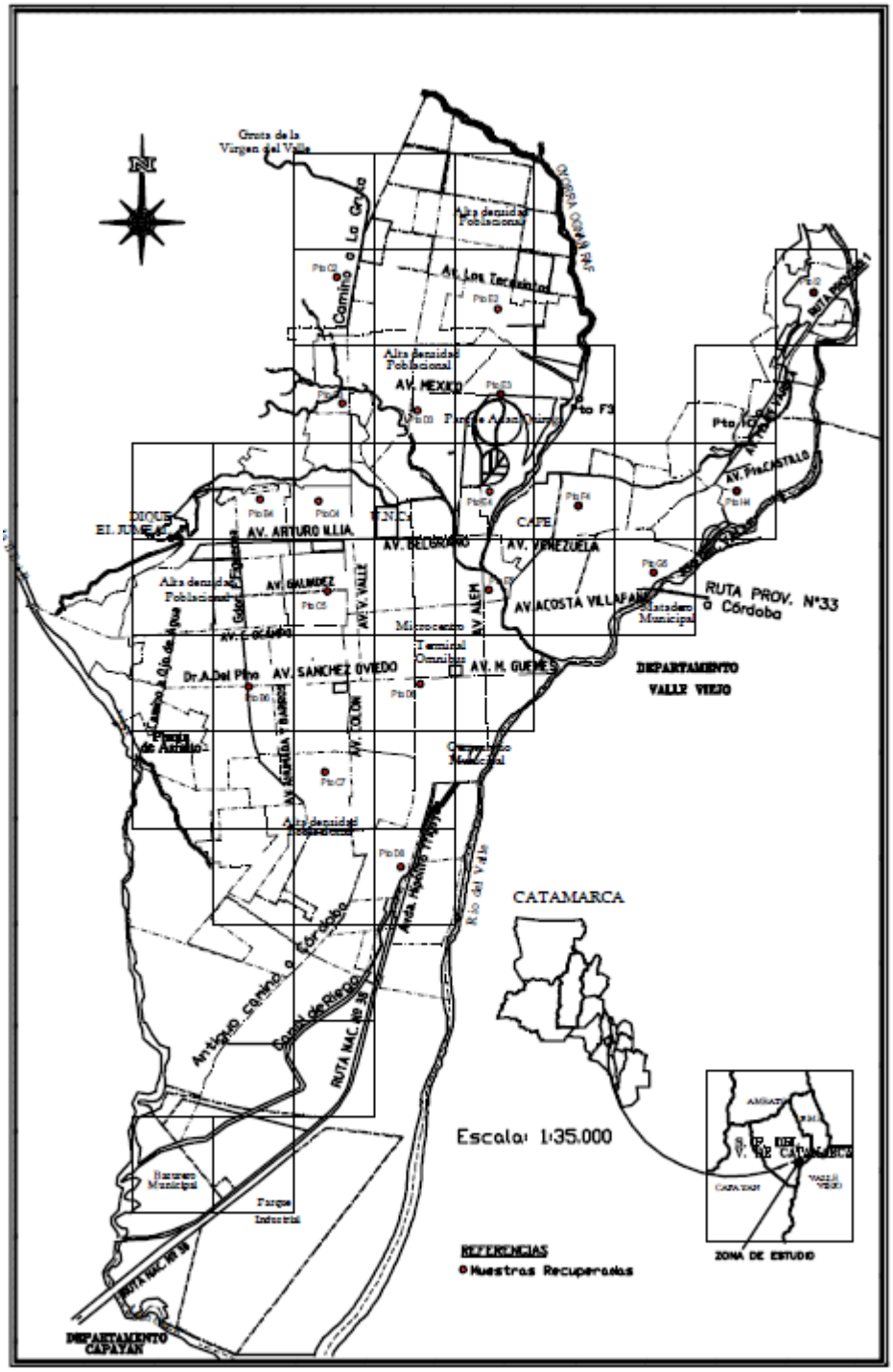


Figura 1. Ubicación de los sitios de monitoreo en la ciudad de S.F.V. de Catamarca. Se muestra, en rojo, los 18 sitios donde se recuperaron las muestras.

Análisis químicos

Las determinaciones se realizaron a partir de tres submuestras independientes extraídas de cada bolsa liquénica.

Para la cuantificación de proteínas solubles, 100 mg de muestra liquénica fueron sujetos a una extracción con buffer fosfato de sodio 0,1 M pH 7,0 mediante un homogeneizador; y posteriormente las proteínas se analizaron en el extracto de acuerdo a la técnica de Kalckar (1947) [43]. Se registró la absorbancia a 260 y 280 nm. Sobre la base del peso seco se calculó la concentración de proteínas solubles la cual se expresó en mg/g P.S.

Para la cuantificación de pigmentos fotosintéticos, se homogeneizaron 100 mg de material liquénico en 10 mL de etanol al 96 % v/v a temperatura ambiente. Se separó el sobrenadante y se midió la absorbancia

de clorofilas a 665 y 649 nm. Posteriormente se agregaron 1 mL HCl 0,06 M a 5 mL del extracto de clorofilas a fin de lograr la formación de feofitinas, y se registraron la absorbancia de feofitinas a 666 y 654 nm. Sobre la base de peso seco se calculó las concentraciones (en mg/g) de clorofilas (Clor. *a*, Clor. *b* y Clor. Total como Clor. *a* + Clor. *b*), de acuerdo a Lichtenthaler y Wellburn (1983) [44]. Las concentraciones de feofitinas (Feof. *a*, Feof. *b* y Feof. Total como Feof. *a* + Feof. *b*) se calcularon según Wintermans y De Mots (1965) [45]. Se obtuvo, además, el cociente Clor. *b*/Clor. *a* y el índice de feofitinización Feof. *a*/Clor.*a*.
En todos los casos las mediciones se realizaron con un espectrofotómetro *Labomed UV-2502*.

Análisis estadísticos

Las determinaciones químicas se realizarán en 3 submuestras de cada bolsa liquénica. Los datos obtenidos se analizaron mediante ANOVA, siendo los supuestos del modelo previamente chequeados a través de métodos analíticos y gráficos. Cuando las diferencias fueron significativas a un $p \leq 0,05$, se aplicó LSD (Mínima Diferencia Significativa) como test a posteriori.
A fin de georeferenciar la información obtenida, se registró las coordenadas y la cota de cada sitio de monitoreo. Esto permite la organización y procesamiento posterior de los datos mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS) y la aplicación de técnicas geoestadísticas.

RESULTADOS

Como primer análisis se compararon los datos obtenidos entre las muestras basales y las trasplantadas a sitios urbanos. Esto se realiza para ver, en general, si hay diferencias entre áreas muy poco polutas (Miraflores), con áreas urbanizadas y zonas detectadas *a priori* como de alto nivel de polución (S.F.V.C.). Posteriormente, se analizaron los datos obtenidos en las muestras liquénicas trasplantadas a sitios urbanos.

Sitios urbanos vs basales

Se observó que la concentración de proteínas es mayor en las muestras trasplantadas a sitios urbanos respecto de las muestras basales (ver Figura 2). Como puede observarse en la figura 3, en todos los pigmentos analizados no hay diferencia significativa entre los basales y las muestras trasplantadas a sitios urbanos, excepto en el parámetro denominado Índice de feofitinización (Feo. *a*/Clor. *a*) ($p<0,05$).

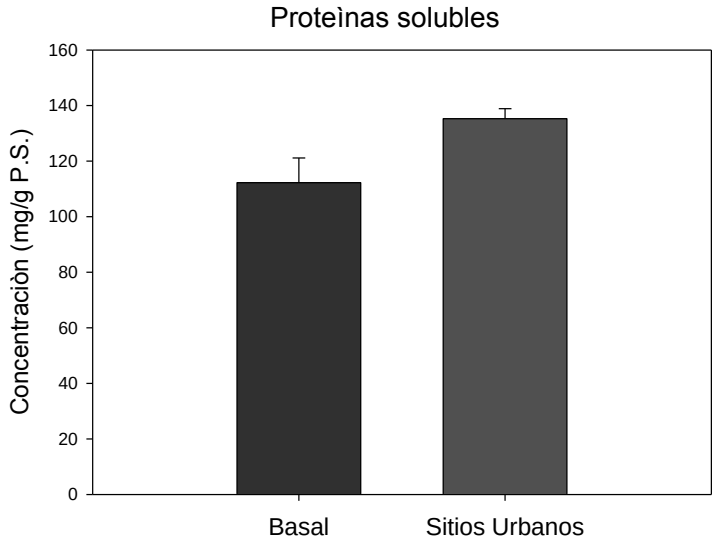


Figura 2. Concentración de proteínas solubles en *P. cetratum* en muestras basales y en muestras trasplantadas a sitios urbanos (S.F.V.C).

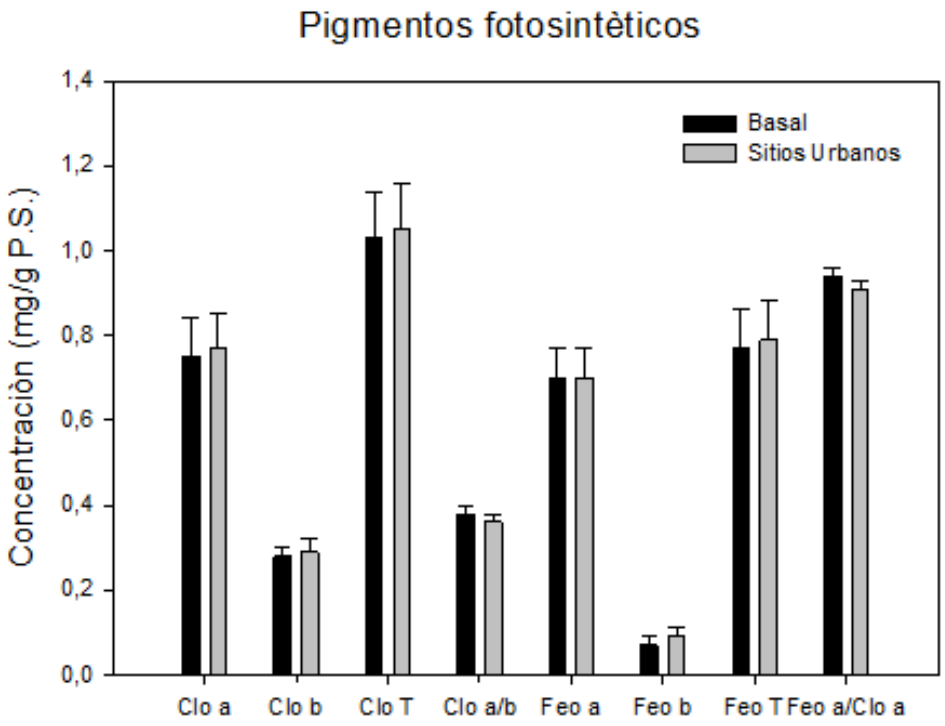


Figura 3. Concentración de pigmentos fotosintéticos medidos en *P. cetratum* en muestras basales y en muestras trasplantadas a sitios urbanos (S.F.V.C).

Sitios urbanos

El resultado del ANOVA (ver Tablas I y II) indica que hay diferencias significativas entre las muestras trasplantadas a los sitios urbanos en todos los parámetros analizados excepto en el Índice de feofitinizaciòn (Feo a/Clo a).

Como puede observarse en la tabla 1, el contenido de proteínas solubles fue bajo en los sitios E4 (Parque Adán Quiroga), D8 (Av. Hipólito Irigoyen) y G5 (a 200 m. del rio del Valle). Estas áreas están caracterizadas por presentar un alto tránsito vehicular, generando grandes cantidades de gases de combustión (SO_2, NO_X, CO_2, principalmente) y una concentración de metales pesados (Cu, Zn, Pb, Sb, entre otros). Mientras que en el sitio B4 (Av. Bartolomé Castro, inmediaciones del dique El Jumeal) el contenido de proteínas fue alto.

En la mayoría de los sitios antes mencionados, se pudo observar bajo contenido de pigmentos (ver Tablas I y II), excepto en el sitio B4 en donde la concentración de este parámetro es alta.

A los fines de indagar respecto al grado de asociación entre las variables cuantificadas, se realizó un análisis de correlación de Pearson. El contenido de proteínas correlacionó negativamente ($p < 0,05$) con la concentración de clorofila a ($r = - 0,1644$), clorofila b ($r = - 0,1568$), clorofila total ($r = - 0,1635$), feofitina a ($r = - 0,1575$) y feofitina total ($r = - 0,1630$), siendo la única correlación positiva con el parámetro clorofila b/a ($r= 0,0349$).

Tabla I. Valores de Media ± Desvío Estándar de proteínas solubles, clorofila *a* (Clor. *a*), clorofila *b* (Clor. *b*), clorofilas totales (Clor. total), y el índice Clorofila *b*/Clorofila *a* (Clor. *b*/Clor. *a*) en *P. cetratum* trasplantada a distintos sitios urbanos (S.U.). Los valores seguidos de una misma letra no difieren a un p<0,05 (Test LSD).

S.U.	Proteínas solubles	Clor. *a*	Clor. *b*	Clor. Total	Clor. *b*/Clor. *a*
C2	131,99 ±18,21 bcd	0,839 ± 0,06 c	0,315 ±0,03 ab	1,154 ±0,08 bc	0,376 ±0,03 ab
E2	117,95 ±9,19 cd	0,854 ± 0,01 bc	0,316 ±0,01 ab	1,169 ±0,02 bc	0,370 ±0,01 abcd
C3	162,86 ±17,99 ab	0,654 ± 0,10 ef	0,252 ±0,03 cd	0,906 ±0,13 def	0,386 ±0,02 a
D3	146,94 ±21,44 abcd	0,868 ± 0,09 bc	0,327 ±0,02 ab	1,195 ±0,11 abc	0,377 ±0,01 ab
E3	126,02 ±29,26 bcd	0,528 ± 0,07 f	0,188 ±0,01 e	0,716 ±0,08 ef	0,359 ±0,03 abcde
B4	185,21 ±66,72 a	0,506 ± 0,01 f	0,181 ±0,01 e	0,687 ±0,01 f	0,359 ±0,02 abcde
C4	137,31 ±14,31 bcd	0,615 ± 0,03 f	0,210 ±0,02 de	0,825 ±0,05 ef	0,342 ±0,02 cde
E4	107,51 ±8,35 d	0,584 ± 0,03 f	0,225 ±0,01 de	0,809 ±0,03 ef	0,386 ±0,04 a
F4	147,89 ±9,09 abcd	0,631 ± 0,05 f	0,212 ±0,01 de	0,843 ±0,06 ef	0,336 ±0,01 e
H4	145,35 ±27,52 abcd	0,804 ± 0,21 cde	0,286 ±0,07 bc	1,090 ±0,28 cd	0,357 ±0,01 abcde
I2	128,12 ±13,07 bcd	0,945 ± 0,10 abc	0,351 ±0,03 a	1,296 ±0,13 abc	0,372 ±0,01 abc
C5	131,12 ±46,98 bcd	0,860 ± 0,07 bc	0,313 ±0,03 ab	1,173 ±0,10 bc	0,363 ±0,002 abcde
E5	158,06 ±20,67 abc	0,803 ± 0,10 cde	0,291 ±0,03 bc	1,094 ±0,13 cd	0,363 ±0,01 abcde
B6	142,51 ±9,30 bcd	1,011 ± 0,16 ab	0,346 ±0,06 a	1,358 ±0,22 ab	0,343 ±0,01 cde
D6	118,82 ±15,98 cd	0,891 ± 0,09 abc	0,311 ±0,03 ab	1,203 ±0,12 abc	0,349 ±0,01 bcde
C7	120,94 ±4,60 cd	1,046 ± 0,20 a	0,352 ±0,05 a	1,398 ±0,25 a	0,339 ±0,02 de
D8	112,75 ±4,83 d	0,670 ± 0,04 def	0,252 ±0,02 cd	0,922 ±0,06 de	0,376 ±0,02 ab
G5	113,74 ±7,76 d	0,834 ± 0,09 cd	0,287 ±0,04 bc	1,121 ±0,13 cd	0,344 ±0,01 cde
ANOVA	p<0,05	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,05

Tabla II. Valores de Media ± Desvío Estándar de feofitina *a* (Feo. *a*), feofitina *b* (Feo. *b*), feofitina totales (Feo. total), y el índice Feofitina *a*/Clorofila *a* (Feo. *a*/Clor. *a*) en *P. cetratum* trasplantada a distintos sitios urbanos (S.U.). Los valores seguidos de una misma letra no difieren a un p<0,05, excepto el índice de feofitinización que no es significativo (n.s.) (Test LSD).

S.U.	Feof. *a*	Feof. *b*	Feof. Total	Feof. *a*/Clor. *a*
C2	0,785 ±0,04 abc	0,079 ±0,03 defghi	0,864 ±0,06 bc	0,936 ±0,03
E2	0,772 ±0,03 bc	0,100 ±0,02 cdefg	0,872 ±0,1 bc	0,904 ±0,04
C3	0,601 ±0,08 de	0,066 ±0,03 fghi	0,667 ±0,10 ef	0,921 ±0,03
D3	0,785 ±0,06 abc	0,099 ±0,03 cdefg	0,885 ±0,09 bc	0,906 ±0,03
E3	0,477 ±0,08 e	0,065 ±0,01 ghi	0,542 ±0,08 f	0,901 ±0,03
B4	0,476 ±0,01 e	0,049 ±0,02 hi	0,525 ±0,01 f	0,942 ±0,04
C4	0,557 ±0,03 e	0,078 ±0,004 defghi	0,635 ±0,03 f	0,905 ±0,01
E4	0,558 ±0,01 e	0,045 ±0,03 i	0,603 ±0,04 f	0,957 ±0,04
F4	0,581 ±0,04 e	0,075 ±0,02 efghi	0,656 ±0,05 ef	0,921 ±0,02
H4	0,734 ±0,18 cd	0,095 ±0,04 cdefg	0,828 ±0,22 cde	0,915 ±0,02
I2	0,861 ±0,10 abc	0,106 ±0,01 bcde	0,967 ±0,11 abc	0,910 ±0,02
C5	0,777 ±0,06 bc	0,104 ±0,01 cdef	0,881 ±0,07 bc	0,904 ±0,01
E5	0,746 ±0,10 bcd	0,083 ±0,01 cdefgh	0,829 ±0,11 cde	0,928 ±0,02
B6	0,894 ±0,16 ab	0,143 ±0,02 ab	1,037 ±0,17 ab	0,883 ±0,02
D6	0,803 ±0,07 abc	0,114 ±0,02 abcd	0,917 ±0,09 abc	0,901 ±0,01
C7	0,934 ±0,17 a	0,144 ±0,04 a	1,078 ±0,21 a	0,895 ±0,01
D8	0,618 ±0,04 de	0,069 ±0,02 fghi	0,687 ±0,04 def	0,922 ±0,03
G5	0,738 ±0,07 cd	0,117 ±0,02 abc	0,855 ±0,09 cd	0,886 ±0,01
ANOVA	p<0,001	p<0,001	p<0,001	n.s.

DISCUSIÓN

Como ya se ha mencionado, los líquenes son organismos sensibles a la contaminación del aire, ya que son grandes receptores de la deposición atmosférica (precipitación, niebla, rocío, sedimentación, deposición seca), lo que permite la elección de la especie adecuada de acuerdo a su grado de sensibilidad, abundancia y disponibilidad en el área de estudio.
La especie *P. cetratum* es abundante en una región poco antropizada de la provincia de Catamarca; por tanto su estudio como potencial bioindicador es de fundamental importancia para la investigación de calidad atmosférica.
En estudios preliminares de esta especie, se observó una cierta respuesta fisiológica luego de estar expuesta a distintas condiciones ambientales en la ciudad de Catamarca. La evidencia más clara fue con relación al contenido de pigmentos y del cociente Clor. *b*/Clor. *a*. Se detectaron concentraciones superiores de pigmentos en sitios muy transitados en la ciudad y altos valores del cociente antes mencionado; esto estaría indicando un cierto grado de afectación de los talos [31].
El contenido de pigmentos fotosintéticos ha demostrados ser buen indicador de stress por polución en líquenes debido a que permite tener información sobre la actividad fotosintética que realiza el fotobionte y, particularmente, el contenido de clorofilas como indicador de la eficiencia fotoquímica; y además, el contenido de feofitinas como productos de degradación de las clorofilas.
Respecto a las proteínas, se ha encontrado que el contenido se redujo debido a la exposición de los líquenes con SO_2 [46], y que en áreas con mucho tráfico se puede alterar la biosíntesis de proteínas en los organismos como mecanismo adaptativo al estrés [47]. La reducción en el contenido de proteínas podría deberse a una disminución en la fotosíntesis y/o en la ruptura de proteínas existente; o a la reducción de la síntesis *de novo* [39].
Teniendo en cuenta esto y los resultados obtenidos en el presente trabajo, se podría inferir que la disminución en la concentración de proteínas en los sitios D4, E8 y G5, podría ser debida a la exposición de los líquenes al SO_2 producido por el intenso tráfico vehicular que presentan los sitios de monitoreo.
Al analizar el índice Clor. *b*/Clor. *a* se muestra como áreas de baja calidad atmosférica a los sitios E4 y D8. Este índice ha sido interpretado como indicador de daño en líquenes expuestos a polutantes atmosféricos [27,48]. Los valores elevados de índice, indican mayor nivel de estrés en el liquen.

CONCLUSIONES

Sobre la base de los parámetros biomarcadores analizados, los talos trasplantados a sitios urbanos no mostraron síntomas de estrés al ser comparados con el nivel basal. Por tanto, se infiere un bajo nivel de estrés en *P. cetratum* al ser expuesta a condiciones diferentes al de su ambiente natural.
Al comparar los sitios urbanos, pudo inferirse una disminución de la concentración de proteínas solubles, particularmente en sitios cercanos a áreas con mayor tránsito vehicular.
Por tal motivo, para establecer su potencial como biomarcador en *P. cetratum*, será necesario analizar este parámetro conjuntamente con otros compuestos marcadores del efecto producido por polutantes atmosféricos sobre líquenes.

REFERENCIAS

[1] Markert, B. Instrumental Analysis of Plants. En: *Plants as Biomonitors – Indicators for Heavy Metals in the terrestrial Environment*. New York: VHC-Publisher. 1993.
[2] Bargagli R. *Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*. Springer-Verlag, Berlino, 324 pp. 1998.
[3] Bennett, J. P. & C. M. Wetmore**.** Changes in element content of selected lichens over 11 years in northern Minnesota, USA. *Environmental and Experimental Botany* **41(1)** (1999), 75-82.
[4] Markert BA, Breure AM & Zechmeister HG. Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment. In: Markert BA, Breure AM & Zechmeister HG (eds) *Bioindicators and biomonitors*. Elsevier, Oxford. (2003), 3-39.

[5] Nimis, P. L., Castello, M.; Perotti, M. *Lichens as bioindicators of heave metal pollution: a case study at La Spezia (N Italy).* In: Market, B. (Ed.), Plants as Biomonitors. VCH Plublishers, Winheim,pp. 265-284. 1993.
[6] Carreras, H.A., Gudiño, G.L., Pignata, M.L. Comparative biomonitoring of atmospheric quality in five zones of Córdoba city (Argentina) employing the transplanted lichen Usnea sp., *Environmental Pollution* **103** (1998), 317-325.
[7] Carreras, H.A., Wannaz, E.D., Pérez, C.A. Pignata, M.L., The role of urban air pollutants on the performance of heavy metal accumulation in Usnea amblyoclada, *Environmental Research* **97** (2005), 50-57.
[8] Arndt, U., Flores, F. & Weinstein, L. *Efeitos do flúor sobre as plantas: Diagnose de danos na vegetacao do Brasil.* Editora da Universidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. 155p. 1995.
[9] Conti M.E. and Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review, *Environmental Pollution* **114** (2001), 471-492.
[10] Shugart L.R. Molecular markers to toxic agents, in M.C. Newman and C.H. Jagoe (eds), *Ecotoxicology: A Hierarchical Treatment*, CRC-Lewis Publishers, New York. 1996.
[11] Rabe R. and Kreeb K.H. Enzyme activities and chlorophyll and protein content in plants as indicators of air pollution, *Environmental Pollution* **1** (1979), 45-56.
[12] Van Gestel, C.A.M., Van Brummelen, T.C. *Ecotoxicology* 5: 217-225. 1996.
[13] Markert, B., Oehlmann, J., Roth, M. General aspects of heavy metal monitoring by plants and animals. En: *Environmental Biomonitoring - Exposure Assessment and Specimen Banking.* Subramanian, K.S. & G.V. Iyengar, eds. ACS Symposium Series 654, American Chemical Society, Washington, DC. (1997), 18-29.
[14] Palomeque, L.I., Mohaded Aybar, C.B., Ocampo, A.I., Severini, P. & M.S. Cañas, Evaluación de la calidad de aire en un sector del departamento Belén (Catamarca) mediante el empleo de *Parmotrema austrosinense* como biomonitora. En: *Investigaciones Docentes en Ingeniería*, Editorial Sarquís, 189-192, 2006.
[15] Palomeque L.I., Jasan, R.C., Ocampo, A.I., Mohaded Aybar, C.B., Fuentes, G.C., Moyano, R.G., Plá, R.R., Cañas, M.S., Análisis preliminar de las respuestas química y fisiológica de *P. austrosinense* transplantada a un área del oeste catamarqueño. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial ECO UNT, VI-41-46, 2007.
[16] Jasan R.C., Mohaded Aybar C.B., Ocampo A.I., Palomeque L.I. and Cañas M.S. Elemental composition analysis in lichens transplanted to the western region of Catamarca (Argentina), *International Journal of Environment and Health* **5 (4)** (2011), 304 – 317.
[17] Mohaded Aybar C.B., Ocampo, A.I., Villegas, R.L., Cañas, M.S., Comparación de la respuesta química de dos especies liquénicas transplantadas a la región minera del oeste de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial Científica Universitaria UNCa, Tomo I, III-71-75, 2008.
[18] Mohaded Aybar, C.B., Ocampo, A.I., Palomeque, L.I., Cañas, M.S., Determinación del contenido de azufre y un índice de polución en dos especies liquénicas transplantadas a la región minera del oeste de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial EUNSa – EdiUNJu, 201-205, 2010.
[19] Ocampo, A.I., Jasan, R.C., Mohaded Aybar, C.B., Moyano, R.G., Córdoba, S.K., Plá, R.R., Cañas, M.S., Relación entre el nivel de tránsito vehicular y el contenido de elementos traza en líquenes transplantados al área central de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, Editorial Científica Universitaria UNCa, Tomo 1, 557-564, 2011a.
[20] Ocampo A.I., Mohaded Aybar, C.B., Moyano, R.G., Álvarez, V.A., Acosta, W.D., Cañas, M.S., Análisis de la respuesta fisiológica de *Parmotrema austrosinense* transplantada al área central de San Fernando del Valle de Catamarca, *Actas del 7º Encuentro del "International Center of Earth Sciences" (E-ICES 7)*, Malargüe, Argentina, 2011b.
[21] Córdoba, K.S., Ocampo, A.I., Moyano, R.G. & M.S. Cañas, Análisis del contenido de ácido lecanórico y pigmentos fotosintéticos en líquenes trasplantados a San Fernando del Valle de Catamarca, *Producciones Científicas de la Facultad de Tecnología III*, Editorial Científica Universitaria UNCa, 87-94, 2012.
[22] Mohaded Aybar C.B., Ocampo, A.I., Villegas, R.L., Cañas, M.S., Comparación de la respuesta química de dos especies liquénicas transplantadas a la región minera del oeste de Catamarca. En:

Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA, Editorial Científica Universitaria UNCa, Tomo I, III-71-75, 2008.
[23] Ocampo, A.I., Moyano, R.G., Coronel, R.J., Acosta, W.D., Segura, L.J.M., Cañas, M.S. Evaluación de la calidad del aire de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca mediante el empleo de *Parmotrema autrosinense* como biomonitor. *Actas del 9º Encuentro del "International Center of Earth Sciences" (E-ICES 9*). Malargüe, Argentina. 2013b.
[24] Gries, C., *Lichens as indicators of air pollution*, Lichen Biology. T. H. Nash III, Cambridge University Press, 240-254, 1996.
[25] González, C.M., Casanovas, S.S. & M.L. Pignata, Biomonitoring of air pollution in Córdoba, Argentina employing *Ramalina ecklonii* (Spreng.) Mey. and Flott., *Environmental Pollution* **91** (1996), 269-277.
[26] Cañas, M.S., Orellana, L. & M.L. Pignata, Chemical response of the lichens *Parmotrema austrosinense* and *P. conferendum* transplanted to urban and non-polluted environments, *Annales Botanici Fennici* **34** (1997), 27-34.
[27] Cañas, M.S. & M.L. Pignata, Temporal variation of pigments and peroxidation products in the lichen *Parmotrema uruguense* (Krempelh.) Hale transplanted to urban and non-polluted environments, *Symbiosis* **24** (1998), 147-162.
[28] Carreras, H.A., Gudiño, G.L. & M.L. Pignata, Comparative biomonitoring of atmospheric quality in five zones of Córdoba city (Argentina) employing the transplanted lichen *Usnea* sp., *Environmental Pollution* **103** (1998), 317-325.
[29] Cañas, M.S., Pignata, M.L., Efecto de contaminantes atmosféricos urbano-industriales sobre el liquen *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale, *Ciencia* **1(1)** (2003), 87-100.
[30] Garty, J., N. Kardish, J. Hagemeyer & R. Ronen, Correlations between the concentration of adenosine triphosphate, chlorophyll degradation and the amounts of airborne heavy metals and sulphur in a transplanted lichen, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **17** (1988), 601-611.
[31] Ocampo, A.I., Hernández, J.M., Alvarez, V.A., Coronel, R.J., Acosta, W.D., Moyano, R.G., Cañas, M.S.,Contenido de pigmentos fotosintéticos en el liquen *Parmotrema austrosinense* trasplantado en la ciudad Capital y al área de colección (Los Varela, Ambato) en Catamarca, Argentina. En: *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA.* Santiago del Estero, Argentina. Formato digital. ISSN 1853-7871. 2013a.
[32] González, C.M. & M.L. Pignata,The influence of air pollution on soluble proteins, chlorophyll degradation, MDA, sulphur and amounts of heavy metals in a transplanted lichen, *Chemistry and Ecology* **9** (1994), 105-113.
[33] González, C.M., Pignata, M.L. & L. Orellana, Applications of redundancy analysis for the detection of chemical response patterns to air pollution in lichen, *The Science of the Total Environment* **312** (2003), 245-253.
[34] Bouchelaghem S., Djebar-Berrebbah, H. Djebar, M. R., The impact of dust emits by the steel complex of El Hadjar (ANNABA) on two biological models: Mousses and lichens African, *Journal of Biotechnology* **10 (18)** (2011), 3574-3578.
[35] Malhotra SS., Khan, A.A. Sensitivity to SO_2 of various metabolic processes in an epiphytic lichen, *Evernia mesomorpha*, *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*: BPP **178** (1983), 121-130.
[36] Fields, R. D. & St Clair, L. L. A comparison of methods for evaluating SO2 impact on selected lichen species: Parmelia chlorochroa, Collema polycarpon and Lecanora muralis. *Bryologist* **87** (1984), 297-301.
[37] Riga-Karandinos, A.N., Karandinos, M.G, Assessment of air pollution from a lignite power plant in the plain of Megalopolis (Greece) using as biomonitors three species of lichens; impacts on some biochemical parameters of lichens. *Science of the Total Environmental* **215** (1998), 167-183.
[38] Das K., Dey, U., Bhaumik, R., Datta, J.K., Mondal N.K., A comparative study of lichen biochemistry and air pollution status of urban, semi urban and industrial area of Hooghly and Burdwan district, West Bengal, *Journal of Stress Physiology & Biochemistry* **7 (4)** (2011), 311-323.
[39] Singh, P., Jothi, S., Reduction in protein contents in a few plants as indicator of air pollution, *Environmental Science and Pollution Research* **18** (1999), 281-283.
[40] Von Arb C., Brunold, C., Lichen physiology and air pollution. I. Physiological responses of in situ Parmelia sulcata among air pollution zones within Biel, Switzerland, *Canadian Journal of Botany* **68** (1990), 35-42.

[41] Morlans, M.C., Regiones naturales de Catamarca: Provincias Geológicas y Provincias Fitogeográficas, *Revista de Ciencia y Técnica UNCa* **2(2)** (1995), 1-42.

[42] INDEC, Censo Nacional de Población, hogares y viviendas 2010, Serie A, Número 1, 2010.

[42] Kalckar, H. M. Differential spectrophotometry of purine compounds by means of specific enzymes. III Studies of enzymes of purine metabolism. *Journal of Biology and Chemistry* **167** (1947), 445-453.

[44] Lichtenthaler, H.K. & A.R. Wellburn, Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents, *Biochemical Society Transactions* **11** (1983), 591-592.

[45] Wintermans, J.F.G.M., De Mots A., Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their phaeophytins in ethanol, *Biochimica et Biophysica Acta* **169** (1965), 448-453.

[46] Kong FX, Hu W, Chao SY, Sang WL, Wang LS. Physiological responses of the lichen Xanthoparmelia mexicana to oxidative stress of SO2. *Environmental and Experimental Botany* **42** (1999), 201–209.

[47] Shukla, V. Upreti, D.K., Physiological response of the lichen Phaeophyscia hispidula (Ach.) Essl. To the urban environment of Pauri and Srinagar (Garhwal), Himalayas. *Environmental Pollution* **150 (3)** (2007), 295-299.

[48] Palomeque L. I. *Evaluación de la calidad del aire en el centro-oeste catamarqueño (Belén) mediante el empleo de líquenes como biomonitores*, Tesis de Maestría en Conservación y Gestión Ambiental, Universidad Nacional de Catamarca. 2008.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CARTA SÍNTESIS DE VULNERABILIDAD HUMANA

Bertotto J., Gascón M., Miranda M.M., Puccio H., Vera R.

e-mail: justinobertotto@hotmail.com

RESUMEN

Este proyecto de Investigación, de naturaleza interdisciplinaria y carácter inter institucional, propone el diseño de un Sistema de Información Geográfico en Escala 1: 250.000, con cartas temáticas de información histórica de inundaciones y otra de lóbulos de vulnerabilidad humana y el desarrollo de las bases de un software funcional aplicado al estudio, análisis y toma de decisiones, en apoyo a la población afectada por las inundaciones en la Cuenca del Río Salado y otras aledañas en la Provincia de Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos globales y regionales de emergencia más habituales son los terremotos, las inundaciones y los tornados. Desde 1980 al presente, unas 400.000 personas murieron en inundaciones. En 147 países hay poblaciones potencialmente amenazadas por las inundaciones. Las características de las poblaciones humanas y de sus actividades económicas y culturales en relación a los desastres naturales, especialmente inundaciones, lo hacen propenso a recibir daño y provocarle pérdidas de vivienda, cosechas y ganado, aislamiento, mortandad y enfermedades, desarraigo, junto con daños ambientales, entre las dificultades a corto y largo plazo.

El Estado Nacional no dispone la cantidad de recursos para mitigar esas vulnerabilidades en forma simultánea las pérdidas en la producción económica agropecuaria, viviendas y en la infraestructura vial. Los útiles disponibles para el análisis gráfico (cartas temáticas, displays informáticos, etc.) no brindan los volúmenes, la claridad y velocidad de información necesarias para decidir las prioridades de apoyo del Estado ante casos críticos. El modelo hidrológico INA para la Cuenca del Salado[1] aplica para diagnosticar problemas de inundación pasados y presentes, y para analizar la efectividad de las obras de drenaje. El Plan Maestro Integral Cuenca del Salado[2] abarcó aspectos hídricos, ambientales, productivos, económicos e institucionales, proponiendo una serie de medidas estructurales y obras para el manejo ordenado de los excedentes hídricos. Ambos útiles son importantes herramienta de análisis, pero ninguno está especialmente diseñado para la toma de decisiones y asignación de recursos por prioridad y urgencia. La población aledaña a cuenca del rio Salado y, en general la bonaerense, es particularmente vulnerable a los efectos negativos de las inundaciones periódicas. Los elementos / herramientas / útiles para el análisis gráfico disponibles (cartas temáticas, displays informáticos, etc), no brindan los volúmenes, la claridad y velocidad de información necesarias para decidir las prioridades de apoyo del Estado ante casos críticos de inundaciones.

Nuestro proyecto tiene como objetivo brindar esa herramienta a los municipios y mejorar de esta manera las acciones para la reducción de la vulnerabilidad. Ese daño es graficable por cuanto

[1] Instituto Nacional del Agua. Evaluación de las Inundaciones y Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado, mediante Modelación Numérica - Proyecto LHA 331 - Informe LHA 01-331-2 Ezeiza, Julio, 2012.
[2] Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires. Plan Maestro Integral Cuenca del Salado. La Plata 1998.

al ser zonificable, la data de vulnerabilidad, el conjunto de información, pueden tener una expresión gráfica que facilite la rápida interpretación.

Palabras clave: inundaciones, Cuenca del Río Salado, SIG, vulnerabilidad, software

PARTE I BASES PARA EL PROYECTO

Objetivo General: Contribuir a relativizar los efectos de los desastres hídricos disminuyendo los daños ocasionados por inundaciones y mejorando las condiciones humanas del área afectada mediante el desarrollo de una herramienta para el análisis y la toma de decisiones, para iniciar acciones desde la fase anterior a la ocurrencia de un evento hídrico.

Objetivos Específicos:

Determinar las bases del diseño de un sistema de información geográfica para soportar una Carta Síntesis de Vulnerabilidad. (Carta Temática de Niveles Históricos de Inundaciones - Carta Temática de Actividades Humanas y Carta Temática del Riesgo Social) y Desarrollar un software que facilite la aplicación de la carta mencionada.

El modelo permitirá reconocer áreas diferenciadas de vulnerabilidad hídrica, que facilitará la toma de decisiones para la prevención, mitigación y preparación del plan de emergencias de los Centros de Emergencias provinciales y municipales.

Hipótesis

La disponibilidad de una carta Síntesis permite representar eventos, visualizar y analizar la información, actualizar planes, formular requerimientos y gestionar recursos y procedimientos para conducir y tomar decisiones durante crisis producidas por inundaciones y dar respuestas de modo inmediato. Su integración a un Sistema permite graficar zonas de vulnerabilidad, con un conjunto de información, ya datos o conocimientos elaborados, con una expresión gráfica que facilita la rápida interpretación y cuantificar la vulnerabilidad.

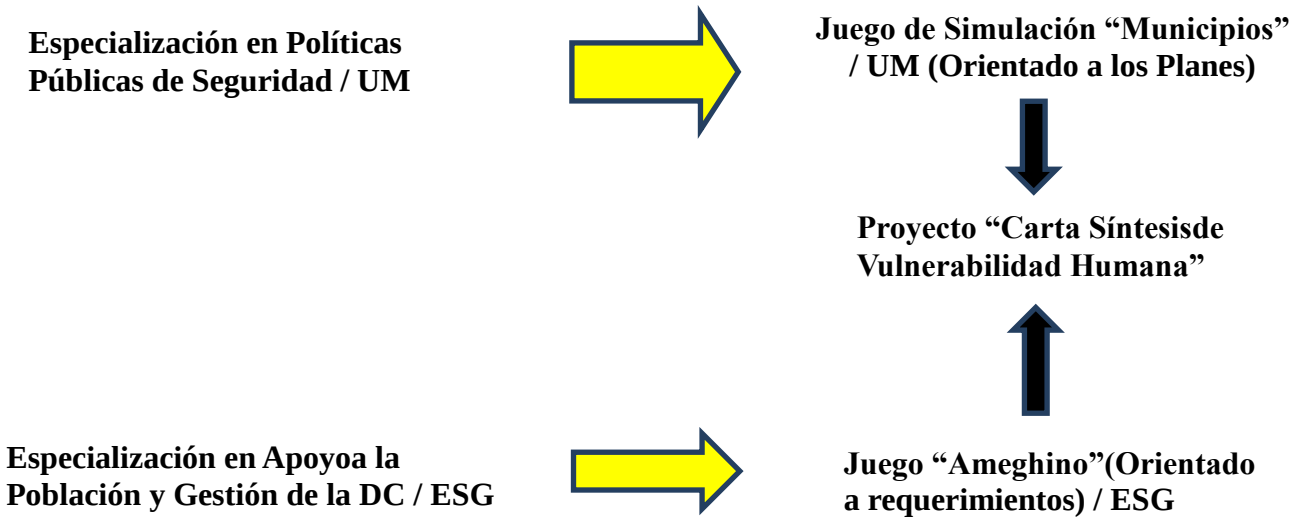
Equipo

Mediante convenio con la universidad de Morón, se amplió el ámbito institucional, lográndose un equipo de investigación para la interdisciplinariedad y la inter-institucionalidad del proyecto:

Investigador	Tarea	Institución
Dr Justino Bertotto	Dirección y Coordinación	ESG / UM
Dr Alberto Castels	Institucionales	ESG / CONICET
Dra Margarita Gascón **Dr Julio Spotta**	Índice de vulnerabilidad Antropología Social	ESG / CONICET ESG / CONICET
Mgr Martin M. Miranda	Riesgo Económico	ESG
Mgr Hilda Puccio:	Riesgo Social	UM
Dr Oscar Bravo **Lic Sabrina Nicolás:** **Mgr Aurora Arena**	Diseño Funcional Programadora Trabajo de Campo	UM UAA

Dr Román Vera **Mgr Leandro Occón**	Marco Jurídico y Administrativo	UM ESG
Mgr Carlos Ferri **Mgr Gloria Montebello**	Cartografía Planeamiento Urbano	CIcia Geoespacial ESG
Cra: Dolores Andrés	Becaria Tesis "Fondos Provincia-les para Emergencias Hídricas"	ESG

Las actividades de investigación se correlacionan con carreras de postgrado y "juegos de simulación", conforme al siguiente esquema:



Estos Juegos de Simulación para Manejo de Crisis Producidas por Inundaciones e Incidencia Humana "Municipios" y "Ameghino" fueron, además de instrumentos didácticos ara el adiestramiento y entrenamiento de Defensa Civil, verdaderos "laboratorios" que permitieron:

- Establecer nuevos convenios con municipios
- Actualizar conocimientos sobre planificación y apoyo en emergencias.
- Actualizar conocimientos sobre legislación de emergencias.
- Actualizar conocimientos sobre directivas del EA para apoyo a la población.
- Ampliar eventos de catástrofes a otras cuencas
- Enfocar las descripciones a las cuencas del R. Salado y del R. Luján
- Precisar sectores de trabajos de campo.

Área de Estudio: La zona seleccionada inicialmente comprende más 200.000km^2. Se puede clasificar, según sus características hídricas, en tres regiones básicas, iniciándose el estudio con la Región Salado-Vallimanca.

Tiempo: Período Estival.

Resultados esperados: Contar con un software que permita representar eventos, visualizar y analizar la información, actualizar planes, formular requerimientos y gestionar recursos y procedimientos para conducir crisis producidas por inundaciones y dar respuestas de modo inmediato, así como graficar zonas de vulnerabilidad, con un conjunto de información, ya datos o conocimientos elaborados, con una expresión gráfica que facilite la rápida interpretación.

Cuantificar la vulnerabilidad humana ponderando las áreas humanas más afectadas por el desastre. Permitirá disponer de equipos formados y entrenados en la temática y falicitará la evaluación de las posibles consecuencias de las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en las distintas áreas de interés, como por ejemplo:

- Zonas afectadas con áreas diferenciadas de vulnerabilidad hídrica.
- Niveles de alertas con disparadores según prioridad.
- Alarma para la ejecución del plan de emergencias
- Lugares prioritarios para evacuación.
- Contingencias de Comunicaciones (Antenas, Radios, Cableado).
- Traza de rutas para equipos de emergencias.

PARTE II ÍNDICE PARA MEDIR LA VULNERABILIDAD HUMANA ANTE CRISIS PRODUCIDAS POR DESASTRES NATURALES E INCIDENCIA ANTRÓPICA

"El riesgo no existe si no tiene presente la componente humana. Se debe tener en cuenta la trascendencia para el hombre, cómo lo afecta y las modificaciones que éste puede introducir en aquel. El riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un peligro Esto incluye la probabilidad de ocurrencia de un acontecimiento natural o antrópico y la valoración por parte del hombre en cuanto a sus efectos nocivos (vulnerabilidad)."
Aneas de Castro

Este indicador permite identificar y analizar diferentes variables que permitan medir la vulnerabilidad tanto espacial como antrópica en un sector de la cuenca del rio Salado, el área inicialmente seleccionada ha sido la región Salado-Vallimanca, y agregadas luego la cuenca del rio Luján y algunos municipios afectados por las crecidas provocadas por los vientos del sudeste. El índice de vulnerabilidad en una carta permite reconocer áreas diferenciadas de vulnerabilidad hídrica, tanto física como humana. Medir dicha vulnerabilidad permite adoptar las mejores decisiones administrativas tanto durante la prevención, como en la conducción de una Emergencia Municipal.

Si bien inicialmente se focalizó la tarea en la Cuenca del Rio Salado, los eventos hídricos sucedidos a fin del año 2015, tanto en la Cuenca del Rio Lujan como en la costa del Rio de la Plata obligaron a incorporar dichas zonas a nuestra investigación y así aprovechar experiencias y anticipar a los municipios relacionaos los beneficios de las transferencias

Descripción de la Cuenca (Tubichá Mini). (34°07′S 61°36′O -35°59′S 57°23′O-)

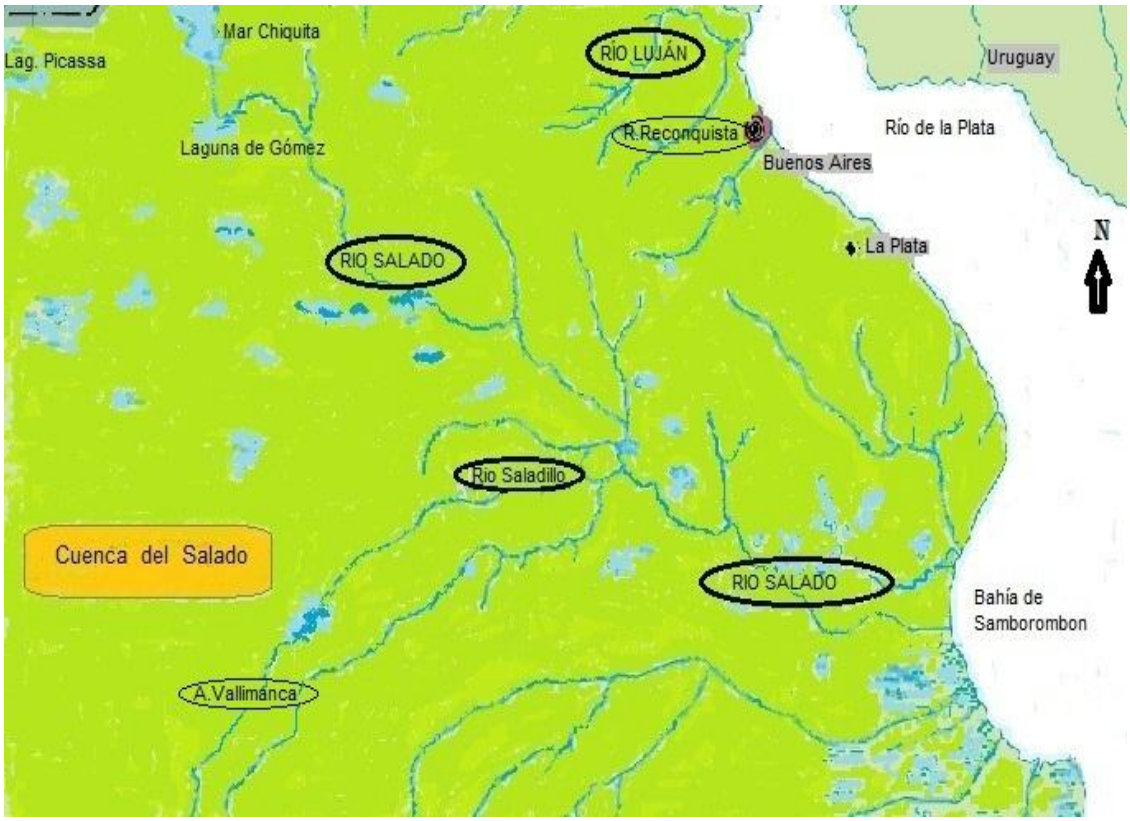
El rio que da nombre a la cuenca nace en la laguna El Chañar en el pueblo de Teodolinda en Santa Fe, a 40 msnm y desemboca a 640 km en la bahía de San Borombón. La zona seleccionada comprende cerca de 170.000km^2. La CRS constituye una **Red Fluvial** (Sistema Hidrográfico de un área política dada), consecuencia de su forma vertical y uno de los elementos básicos de la cohesión interna. De acuerdo con su configuración, clasifica en centrípetas[3]. Se puede clasificar, según sus características hídricas, en tres regiones:

- Región Salado-Vallimanca,
- Región Noroeste y
- Región de las Lagunas Encadenadas del Oeste;

[3] VILLALOBOS, L.,T. "Vocabulario GEOPOLÍTICO", Buenos Aires, UNSAL

(Las dos últimas regiones se vinculan a la cuenca del Río Salado en forma reciente desde la construcción del Canal del Oeste y del Canal Aliviador Alsina).

La característica más destacable del área es su falta de relieve. Al sur, las Sierras de Tandil y la Sierra de la Ventana se elevan entre 500m y 1100m sobre el nivel del mar, pero, la mayor parte del área es una gran planicie que está por debajo de los 100m sobre el nivel del mar. En el límite oeste, (el límite provincial, a 500km desde la Bahía de Samborombón, los niveles del terreno son sólo del orden de los 120m sobre el nivel del mar.



A pesar de existir otras áreas en las provincias limítrofes de Santa Fe, Córdoba y La Pampa que drenan hacia el Salado, el área de estudio yace exclusivamente dentro de la Provincia de Buenos Aires. El área comprende una parte sustancial de la provincia e incluye total o parcialmente 58 partidos, pero la población, de aproximadamente 1.483.533 millones de habitantes (censo 2001) representa menos del 11% del total de la provincia. La población de los centros urbanos, casi el 80% del total, es elevada para un área con predominio de agricultura. Existen pocas ciudades de dimensión significativa. Solo Tandil, Azul, Olavarría y Junín tienen una población que excede los 60.000 habitantes. El río pasa por las ciudades de Junín, Roque Perez, Alberti, Grl Belgrano, Villanueva desembocando en la Bahía de Samborombón cerca del Parque Costero del Sur y la Reserva Natural de la mencionada Bahía

Su principal afluente es el Rio Quinto, que durante los períodos húmedos le alcanza superficialmente aportándole grandes caudales en las proximidades de Bragado, durante los períodos secos el mismo río aporta uncaudal subterráneo desde un sector que se llama "Brazo Norte" entre los bañados de La Amarga hasta la laguna El Chañar. A inicios del presente siglo XXI la construcción del canal Jauretche como parte del llamado Plan maestro Integral ha reactivado en gran medida el nexo superficial entre los ríos Quinto y Salado principalmente desde la Laguna Hinojo Grande Además del río Quinto, los otros principales afluentes provienen del sur, son estos el Saladillo que es continuación del extenso arroyo Vallimanca y del arroyo Las Flores.

Su canalización en la cuenca baja mejoró el avenamiento, que es de 88 m^3/s; cerca de 1 millón de habitantes viven en la cuenca. Sin embargo los canales rectilíneos, que casi en su totalidad desembocan paralelamente en Sam Borombón significan graves problemas ecológicos (y por ende económicos en mediano y largo plazo) ya que facilitan el denodado de la tierra fértil que es de este modo arrastrada velozmente por las aguas hacia el mar y una veloz pérdida del agua dulce durante la temporada de lluvias; esto es, para ahorrar en términos de corto plazo, se ha despreciado el plan propuesto a fines del siglo XIX por el sabio paleontólogo e ingeniero Florentino Ameghino, plan que contempla la derivación de las aguas dulces excedentes hacia zonas bajas y lagunas para crear reservorios (que servirían de repositores del acuífero Puelche. Este Plan incluía construcción de embalse para la piscicultura, forestación de orillas y una red de canales navegables para transporte fluvial.

Descripción general de la Cuenca del Río Luján. (34°25′55″S 58°32′28″O)

La cuenca del río Luján se encuentra localizada al noreste de la provincia de Buenos Aires. Al noroeste limita con la cuenca del río Areco, al sudoeste con la cuenca del río Salado, al sudeste con la cuenca del río Reconquista y al noreste con la cuenca del Paraná. Es un curso fluvial que recorre el norte de la provincia de Buenos Aires (pasando por el área metropolitana de Buenos Aires). Nace de la unión de los arroyos El Durazno y Los Leones, en el partido de Suipacha, recorriendo además, los partidos de Mercedes, Luján, Pilar, Exaltación de la Cruz, Campana, Escobar, Tigre, San Fernando y San Isidro, desembocando en las aguas del estuario Río de la Plata a la altura del Club Náutico San Isidro, a 128 kilómetros de sus nacientes.

Este río cuenta con numerosos arroyos tributarios, como: Grande, Chico, De la Cruz, Balta, Leguizamón o del Chimango y del Oro. En sus aguas, desemboca a pocos kilómetros de su final, el río Reconquista, otro río importante de Buenos Aires, como así también el río Tigre que en realidad es un brazo del anterior. En su último tramo (en los partidos de Escobar, Tigre, San Fernando y San Isidro), está comunicado con el río Paraná de las Palmas a través de diversos ríos, arroyos, y canales, formando islas pertenecientes a la primera sección del Delta del Paraná. Al ser un típico río de llanura ondulada, cuenta con varios meandros y una suave pendiente. Es, además, un muy importante efluente de agua para el Río de la Plata. Está ubicado en la pampa ondulada, y a su paso, forma valles de distintos tipos. Su tramo más ancho, va desde Tigre, hasta San Isidro, desembocando en el Río de la Plata.

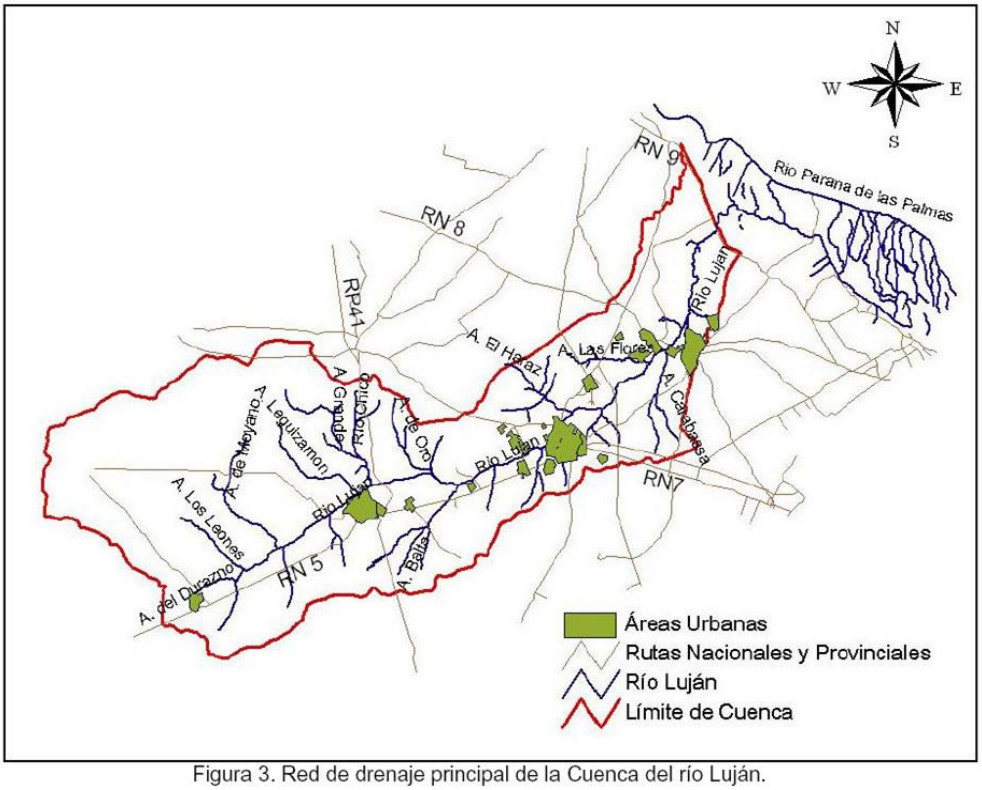


Figura 3. Red de drenaje principal de la Cuenca del río Luján.

El río registra el impacto adverso de la acción antrópica en todo su curso, lo que se manifiesta en la presencia de materia orgánica, que en términos de demanda bioquímica de oxígeno, excede los niveles guía de calidad de agua para todos los usos que se han evaluado, los que son: protección de la vida acuática, fuente de provisión de agua para consumo humano con tratamiento convencional, uso para actividades agropecuarias y uso para recreación humana. Este comportamiento se agudiza en su tramo inferior, lo que es coherente con la disminución progresiva de los tenores de oxígeno disuelto, cuyas medianas son francamente inferiores a los respectivos niveles guía de referencia para los fines antedichos, a partir de la última estación de muestreo del tramo medio.

Las concentraciones de nitrógeno amoniacal y nitrógeno de nitritos también manifiestan el impacto antrópico sobre el río Luján pues exceden los niveles guía para protección de la vida acuática y uso para fuente de provisión de agua para consumo humano con tratamiento convencional. Los valores correspondientes a la presencia de bacterias coliformes, afectan las posibilidades de uso recreativo y también la de uso para actividades agropecuarias e incluso para fuente de provisión de agua para consumo humano con tratamiento convencional.

En algunas estaciones de muestreo, se ha detectado la presencia de sustancias fenólicas y algunos metales pesados, no sólo en el agua sino también en los sedimentos, con valores que exceden los niveles guía para protección de la vida acuática.

Un Marco Teórico Complejo

Existen tres variables para el análisis de esta problemática. La variable física, descripción del medio caracterizada por la inestabilidad hídrica en relación a los aspectos físicos de la cuenca, la actividad humana y sus procesos económicos y sociales y la relación entre ambas, lo que se sintetiza en vulnerabilidad.

Se emplean técnicas de recolección, análisis e interpretación de datos se procede desde el paradigma mixto; entrevistas y encuestas, con cuestionarios orientados a lograr conocimientos sobre

las necesidades afectadas de la población respecto al problema planteado[4]. También se hacen entrevistas a informantes clave, observación directa, análisis bibliográfico y documental.

La vulnerabilidad antrópica se pondera mediante:

- Distribución de la actividad humana en relación a las zonas afectadas, tanto poblacional como de actividades productivas e infraestructura de energía y de comunicaciones y transporte.
- Proximidad a centros de asistencia de salud,
- Conocimiento y alcance de los planes de emergencia.
- Análisis y ponderación de los factores antropológicos y sociales de la población,
- Evaluación de la experiencia del fenómeno, no solo de la población, sino de las autoridades comunales, grado de resiliencia.

Con la elaboración de cartas temáticas de vulnerabilidad, se obtiene una carta de vulnerabilidad espacial. Se integran las siguientes variables:

- Memoria histórica de las inundaciones
- Escurrimiento vertical
- Escurrimiento horizontal,
- Tipo de suelo,
- Características de la infraestructura hidráulica (canales y terraplenes, etc)
- Características de la infraestructura edilicia,
- Características de la infraestructura de caminos, comunicaciones y de energía.
- Eventos predominantes, a través de rangos previamente asignados que permiten clasificar el grado de vulnerabilidad, (alta, media y baja),

Finalmente, se elabora la Carta Síntesis de la Vulnerabilidad del área que permite caracterizar cada área en el marco general de la Cuenca del Salado con su conjunto habitacional como un todo. Se obtienen así imágenes representativas de las zonas más vulnerables a las que el Gobierno Provincial deberá fijar prioridades de apoyo de acuerdo a su peligrosidad y debilidad.

Sobre la base de este índice es que se ha propuesto elaborar, como un modelo replicable, una "Carta de Vulnerabilidad Humana" del Distrito Luján a escala 1: 250000 como cartografía de base para uso del gobierno o del municipio y cualquier otra organización que la necesitara.

PRINCIPALES RESULTADOS PARCIALES DEL PROYECTO

Índice de Vulnerabilidad Social en la Cuenca del Río Salado

(se expresa a través del daño o perjuicio que recibe el hombre personalmente o en sus pertenencias se entiende que, vulnerabilidad, es un concepto netamente cultural e implica todo aquello que afecta negativamente al ser humano)

Riesgo por DesastresNaturales e Incidencia Antrópica / Amenazas (Peligro) / Vulnerabilidad.

El concepto de amenaza en relación con el cambio climático plantea que esta se produce cuando se registran valores extremos frente a los valores promedio de fenómenos conocidos (como precipitación, temperatura, velocidad del viento, nivel del mar o caudal del río), o cuando una combinación de estos eventos se da en el mismo tiempo y lugar, ya sea en términos de magnitud, de intensidad o de duración de la manifestación climática. Lavell (2011).

[4] De aquí surgió la conveniencia de disponer en los gabinetes de crisis del asesor más importante: el inundado.

En este enfoque, el riesgo se construye "socialmente". Es un enfoque interesado en las condiciones de los individuos, los grupos y las comunidades en relación con el estrés a lo largo del tiempo y de eventos críticos puntuales de origen externo. Privilegia la investigación de los factores que potencian la capacidad de los grupos humanos para enfrentar las situaciones críticas y recuperarse de sus efectos. La centralidad está puesta en el concepto de vulnerabilidad para la comprensión de la adaptación de los sistemas humano-naturales al cambio climático.

La vulnerabilidad no es igual a debilidad, es —entendida como vulnerabilidad social— diferente de la simple exposición a algún tipo de riesgo por falta de capacidades o competencias de individuos u organizaciones. La vulnerabilidad se da cuando, en relación con la exposición a un riesgo, hay también una debilidad y, por lo tanto, una vulneración. Con base en los estudios adelantados hasta la fecha, esta vulneración es de los recursos, activos y capitales para enfrentarse al riesgo sin pérdidas de capacidades y oportunidades (Lampis 2010). Por ende, cuando hablamos de vulnerabilidad social, estamos a la par hablando de problemas irresueltos de desarrollo y de desarrollo humano limitado o de carencias en el logro de este. Según este planteamiento, la vulnerabilidad va más allá de la sensibilidad frente al daño.

Para su medición, no sólo se evalúan la vulnerabilidad socioeconómica (de los hogares) de una comunidad sino también la de los territorios (factores de vulnerabilidad territorial)

Son factores de vulnerabilidad:

1. el estado físico del sitio o región,
2. El empleo,
3. grado de antropización,
4. biodiversidad,
5. actividades productivas y servicios[5] y
6. relaciones espacio-temporales con los fenómenos naturales considerados peligro.

Desde el ámbito social / poblacional:

1. la densidad de población y su distribución,
2. la dinámica demográfica,
3. el ingreso de la población,
4. condición social,
5. nivel de escolaridad y
6. acceso a servicios.

Para recabar información se diseñaron las siguientes tablas:

[5]Los censos de población, los censos económicos, y el seguimiento que las secretarías de estado dan al comportamiento de una rama de la actividad económica, son fuentes de datos crudos a partir de los cuales se pueden construir indicadores.

Tabla I. Tabla elaboración propia.

INFORMACIÓN GENERAL	
INDICADOR	
OBJETIVO	
AREA TEMATICA	
DESCRIPCIÓN	
RELEVANCIA	
FÓRMULA DE CÁLCULO	
DEFINICACIÓN DE VARIABLES	
UNIDAD	
ALCANCE GEOGRÁFICO	
SERIE DE TIEMPO	
FUENTE DE DATOS	
RESPONSABLE	
INFORMACIÓN OPERATIVA	
CÓDIGO	
PERIODICIDAD	
ESTADO DE IMPLEMENTACIÓN	
PRIORIDAD	

Tabla II. Matriz de factores sociodemográficos relacionados con las amenazas registradas

Amenazas hidroclimáticas						
Indicadores	Sequía Agua	Inun-dación	Ola calor	Ola frío	Vientos fuertes	Marejada tormenta
Necesidades básicas insatisfechas (Maternidad. Espacio habitable. Espacio apropiado para cocinar. Llegada, acceso y calidad de agua a la vivienda. Acceso y calidad del servicio higiénico. Acceso a la energía eléctrica. Calefacción. Conservación de alimentos. Calefón. Enseñanza formal de niños y adolescentes).						
Hogar						
Dependencia demográfica de niñez 0 – 5 años	x	x	x	x	x	x
Dependencia demográfica de vejez más 65 años	x	x	x	x	x	x
Dependencia limitación (discapacidad)						
Personas en situación de calle	x	x	x	x	x	x
Salud						
Prevalencia de hepatitis A	x	x	x			x
Prevalencia de leptospirosis hantavirus		x				x
Tasa vacunación contra la gripe	x			x		
Tasa de vacunación contra la hepatitis A	x	x	x			x
Entorno urbanístico						
Presencia de red de saneamiento	x	x	x			x
Presencia de basurales		x	x		x	x
Ausencia de arbolado			x		x	x
Capacidades locales						
Centros sociales y servicios comunitarios	x	x	x	x	x	x
Instituciones de gobierno local	x	x	x	x	x	x
Radio, prensa y TV local	x	x	x	x	x	x
Tecnologías de información y comunicación						
Acceso a internet	x	x	x	x	x	x
Teléfono (fijo y celular)	x	x	x	x	x	x
Tenencia de radio y TV	x	x	x	x	x	x

Tabla III. Ejemplo de aplicación de la Matriz de información para los NBI (necesidades básicas insatisfechas)

INFORMACIÓN	
Indicador	Necesidades básicas insatisfechas
Objetivos	Informa sobre los segmentos censales del país en donde se evidencia un alto número de hogares con necesidades básicas insatisfechas
Área temática	Vulnerabilidad social
Descripción	Porcentaje de hogares sobre el total de hogares al menos una NBI por Segmento Censal
Relevancia	Información pública, adaptación y planificación de políticas públicas
Fórmula de Cálculo	NBI seg=(n hogares con 1NBI/ total de hogares)*100
Definición de variables	Número de hogares en el segmento censal con al menos un NBI. Número total de hogares en el segmento censal
Unidad	Porcentaje
Alcance geográfico	Los partidos de la Pcia. De Buenos Aires, involucrados en la Cuenca del Río Salado
Serie de Tiempo	2011 (último censo)
Fuentes de datos	Indec
Autor	UM

En la Tabla II se relacionan los factores sociodemográficos con el tipo de amenaza

Cartografía construida por la CI Geoespacial

- Carta Imagen Formato Espacial Cuenca de Rio Salado (Prov Bs As) Ela 1:250.000.
- Carta Imagen Formato Espacial Cuenca de Rio Salado (Prov Bs As) Ela 1:250.000. Temática I.
- Carta Imagen Formato Espacial Cuenca de Rio Salado (Prov Bs As) Ela 1:250.000. Temática Asentamientos humanos, demografía, hospitales, policías, unidades militares e infraestructura carretera y ferroviaria.
- Carta Imagen Formato Espacial Municipios de la Costa, Dolores, Castelli, Pila, Las Flores, Lujan, Quilmes, Lomas de Zamora.

BIBLIOGRAFÍA

Documentos

- Plan Maestro del Rio Salado.
- Evaluación de las Inundaciones y Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado, mediante Modelación Numérica - Instituto Nacional del Agua.
- Plan Estratégico Nacional para Desastres.
- Cartografía Soporte Papel Cuenca del Rio Salado y del Rio Luján.
- Actividades Económicas de la Cuenca
- Directiva JEMGE p/Apoyo a la Población
- Dirección Provincial de Defensa Civil

Legislación de Defensa Civil

- Decreto-Ley 11.001/963
- Disposición 03/2004
- Disposición 05/2004

- Disposición 04/2005 - Zonificación decreto 270/07
- Disposición 17/2005
- Decreto 74
- Resolución 262 (Creación Consejo Consultor Permanente del Bombero Voluntario)
- Resolución 2544 Resolución 3291.
- Leyes de Bomberos Voluntarios

REFERENCIAS

ANEAS DE CASTRO, Susana D., "Riesgos y Peligros: Una visión desde la Geografía", Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona, n°60, 15 de marzo de 2000.

BARREDO CANO, José Ignacio: Sistemas de Informacion Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Editorial RA-MA. Madrid.1996.

BOSQUE, J, ESCOBAR,J, GARCIA E, SALADO, M, Sistemas de Información Geográfica Práctica con PC, ARC/INFO E IDRISI Editorial RA-MA Madrid 1994.

BERTOTTO, Justino. "Modelo de Gestión de Crisis ProducidasporDesastresNaturales e IncidenciaAntrópica". Proyectod e Investigación UM. 2007.

BLAIKIE, P., CANNON, 1., DAVIS, 1., WISNER, B., "Vulnerabilidad", 1996, actualizado 2002. Publicación como resultado de los estudios realizados en la Década Internacional de Reducción de Desastres.

FLORES TRUJILLO, John, "La Universidad y los Desastres", "Indicador de la Vulnerabilidad por Amenazas en Desastres", revista Prevenir, Colombia, n° 13, mayo - agosto 1998 Medellín

GASCON, Margarita, *et al*. "Vientos, terremotos, Tsunamis y otras catástrofes naturales, Historia y casos Sudamericanos. Ed Biblos. CABA 2005.

GARCIA, Mónica Cristina, "Vulnerabilidad y atenuación de riesgos en áreas urbanas", Departamento de Geografia, Universidad Nacional de Mar del Plata. 2000.

GUZZO, Elina 1. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofia Humanidades y Artes, UNSJ, San Juan, inédito: "Carta de Vulnerabilidad sísmica en el distritito de Villa Aberastain, Departamento de Pocito", 2002.

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA. Evaluación de las Inundaciones y Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado, mediante Modelación Numérica - Proyecto LHA 331 - Informe LHA 01-331-2 Ezeiza, Julio, 2012

JAIME, Luis y otros "La Vulnerabilidad y los Impactos Naturales", 60 Semana de la Geografia. Departamento de Geografia, Fac. Filosofia y Letras, U.N.Tucumán. 1999.

212

LAMPIS Andrés (2013) *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición.* En CUADERNOS DE GEOGRAFÍA | REVISTA COLOMBIANA DE GEOGRAFÍA | Vol. 22, n.º 2, jul.-dic. del 2013 | ISSN 0121-215X (impreso) · 2256-5442 (en línea) | BOGOTÁ, COLOMBIA | PP. 17-33.

LAMPIS, Andrea. 2010. Pobreza y riesgo medio ambiental: un problema de vulnerabilidad y desarrollo.
http://www.desenredando.org/public/varios/2010/2010-08-30_lampis_2010_Pobreza_y_Riesgo_Medio_Ambiental_Un_Problema_de_Desarrollo.pdf (consultado en diciembre del 2012).

LAVELL, Alan (2011) *Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica.* Secretaría General de la FLACSO y
La Red para el Estudio Social de la Prevención de Desastres en América Latina. En línea en http://www.desenredando.org/public/varios/2011/2011_UICN-FLACSO_Lavell_Adaptacion_Cambio_Climatico.pdf

MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS PÚBLICOS de la Provincia de Buenos Aires. Plan Maestro Integral Cuenca del Salado. La Plata 1998.

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL EN EL ESTUARIO DEL RÍO NEGRO: COMPARACIÓN ENTRE *ESCHERICHIA COLI* Y ENTEROCOCOS*

Cambruzzi N [ab], Abrameto M [b], Abate S[ab]

[a]*Laboratorio Patagónico de Diagnostico Agroalimentario (Funbapa), Río Negro, ARGENTINA*
[b]*Universidad Nac. de Rio Negro–Sede Atlantica–Viedma–Rio Negro, ARGENTINA*

e-mail: n.cambruzzi@email.com

* *Este trabajo fue ganador del Segundo Premio del Concurso de Jóvenes Investigadores del Encuentro E-ICES 11*

RESUMEN

El río Negro es uno de los más importantes de Argentina por su magnitud y las actividades desarrolladas en sus riberas. Pose un estuario de 70 km de longitud influenciado significativamente por las mareas diarias. Este estuario tiene una gran importancia ecológica por constituir un sistema con gran variedad de hábitats que alberga numerosas especies, garantizando la biodiversidad y funcionando como reservorio temporal de nutrientes, contaminantes y sedimentos. Los diferentes usos que se dan a sus aguas revelan los beneficios económicos y culturales de este estuario para la comunidad: recreación y deportes náuticos, uso agrícola (riego y bebida de animales de interés pecuario), consumo humano, etc. Dada la relación entre la población y agua del estuario, diversas autoridades de control realizan un estudio continuo y sistemático de su situación microbiológica utilizando como método el número más probable (NMP) de E. coli. En este trabajo se comparó dicho método con el recuento de unidad formadora de colonia (UFC) de enterococos por filtración de membrana (FM), en muestras del balneario de la ciudad de Viedma tomadas estacionalmente durante un año. En algunos muestreos solo el recuento de UFC de enterococos por FM fue capaz de identificar riesgo para la salud pública por contaminación fecal en agua del estuario. Estos resultados sugieren la conveniencia de incluir el recuento de UFC de enterococos para realizar controles microbiológicos del sitio de interés de forma simultánea a los análisis de NMP de E. coli, hasta que se pueda contar con mayor número datos que permitan una interpretación estadísticamente significativa y una ponderación más objetiva de las bondades de cada método. Por otro lado, los resultados microbiológicos obtenidos alertan sobre el estado del balneario del rio Negro, que estaría impactado por la contaminación fecal de origen antrópica cuyo origen podría encontrarse en las plantas de tratamientos cloacales regionales disfuncionales, efluentes de frigorífico y actividades pecuarias, o la contaminación cruzada entre aguas cloacales y desagües pluviales. Para esclarecer esta situación y tomar las medidas de contingencia más adecuadas, resulta crucial intensificar los controles armonizando los métodos de muestreo y de análisis.

Palabras Clave: Río Negro, estuario, *E. coli*, *enterococcus*, contaminación fecal

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el manejo de los recursos hídricos debería establecer un balance entre el uso racional, la conservación y la preservación a largo plazo. Cada vez son más los sitios de alto impacto social, económico y cultural que se encuentran expuestos a variaciones ambientales naturales y antrópicas, produciéndose cambios del ecosistema que alteran su capacidad de recuperación y afecta a la biodiversidad original [1].

Los estuarios constituyen zonas de transición entre ríos y océanos, y resultan complejos ecosistemas acuáticos que suelen ser utilizados con propósitos comerciales, recreacionales e industriales. Sus recursos brindan múltiples beneficios [2], ofreciendo gran variedad de hábitat y refugios para la fauna acuática y terrestre. El río Negro posee un estuario primario, generado por un antiguo valle fluvial, planicie costera que se extiende desde la desembocadura hasta Primera Angostura, aproximadamente 70 km, para alcanzar la zona fluvial en Guardia Mitre. Se caracteriza por un rango de mareas de 6 horas, alcanzando 4,4 metros (pleamar) a 0,71 m (bajamar), por lo que es clasificado como macromareal [3]. El área urbana vinculada al estuario del rio Negro está comprendida por las ciudades de Viedma y Carmen de Patagones, así como San Javier y Guardia Mitre.

El monitoreo integral de calidad de agua es limitado en Argentina, por lo general se restringe a sitios puntuales [4]. En Rio Negro las autoridades controlan balnearios y sitios de captación de agua para abastecimiento de la población, mediante indicadores y técnicas tradicionalmente utilizadas como es el número más probable (NMP) de *E. coli* y adoptando como criterios de identificación a las Guías Canadienses de Calidad de Agua [5; 6].

La determinación de microorganismos indicadores de contaminación fecal y su grado de persistencia en aguas superficiales es fundamental para estimar la posible presencia de microorganismos patógenos, como así también para identificar el origen y período en el que se genera la contaminación [7; 8].

Las aguas recreativas son aquellos cuerpos superficiales que se utilizan principalmente para baño y actividades deportivas [9].En estos casos, la gente establece un contacto de tipo primario por lo que resulta fundamental conocer el estado sanitario del agua. Por lo general, en estos sectores los indicadores más comúnmente utilizados son los Coliformes Fecales, [10]. A partir de los últimos años ha adquirido gran atención la adopción del género *Enterococcus* como indicador de contaminación fecal en cuerpos de agua cuyas condiciones de temperaturas, pH y salinidad son extremas o fluctuantes como ocurre con los estuarios [11]. Considerando que el estuario del rio Negro tiene características ambientales únicas que podrían resultar adversas para la supervivencia de Coliformes en general y *E. coli* en particular, resulta de interés conocer la utilidad de los enterococos como indicadores de contaminación fecal en este hábitat.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Sitio de muestreo

Se seleccionó como área de estudio al balneario más concurrido de la ciudad de Viedma (40º47'59.71"S; 62º59'44.85"O), ubicado a una altura media del estuario del río Negro, provincia de Rio Negro, Argentina, donde se desarrollan diferentes actividades recreacionales durante todo el año (Imagen 1). El clima de la zona es árido a semiárido, de tipo mesotermal con poco o ningún exceso de agua, con una temperatura media anual de 16º C, precipitaciones

anuales de 350 mm y vientos predominantes del oeste que incrementan su intensidad en verano [12].
El muestreo se hizo durante la marea baja para despreciar el efecto de dilución, en forma directa o manual, con recipiente estéril, siempre contra corriente y a una profundidad promedio de 50 cm desde la superficie, siguiendo normas estandarizadas [13]. El procesamiento de las mismas se realizó en un lapso no mayor a las dos horas desde el momento de la toma de muestra. La frecuencia de muestreo fue estacional.

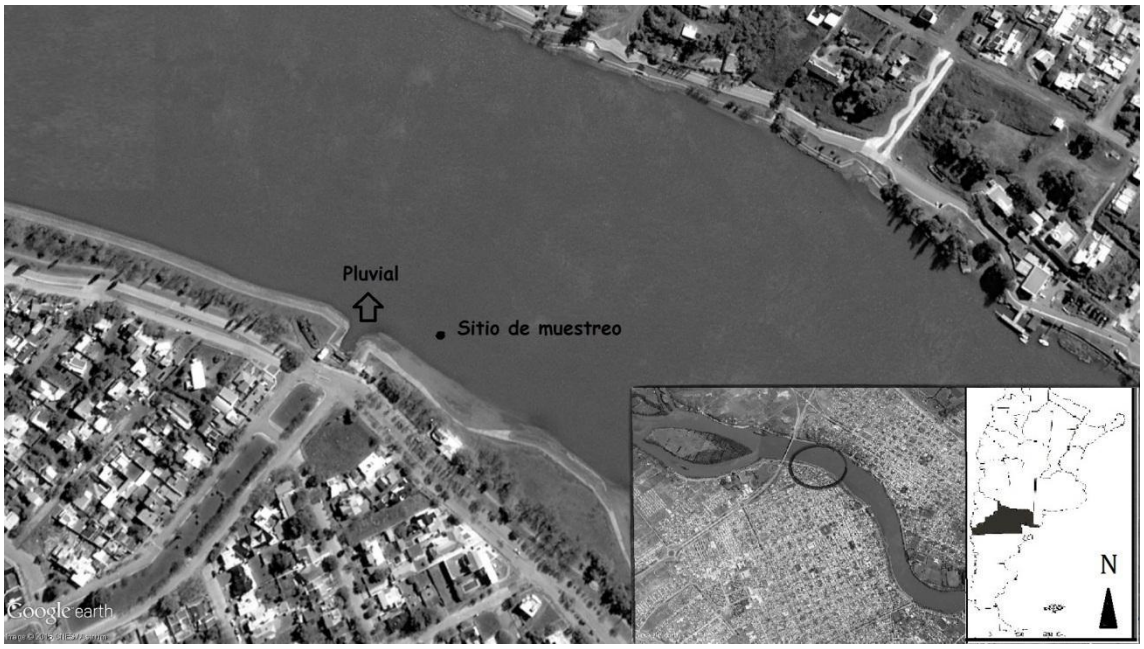


Imagen 1. Balneario municipal y desagote pluvial-Viedma- Río Negro

Metodología

- Recuento de UFC de Enterococos:

Inmediatamente luego de asegurar la correcta homogeneización de cada muestra, se filtraron 100 ml a través de una membrana estéril de acetato de celulosa grillada, de 45 mm de diámetro y 0,45 µm (Gamafil), en un equipo de filtración para vacío de acero inoxidable y usando embudos intercambiables estériles de plástico para cada muestra. Las condiciones de esterilidad se aseguraron mediante el uso de un mechero a gas butano. La calidad de las condiciones de esterilidad se controló mediante el procesamiento de agua estéril previo y posterior al procesamiento de cada muestra, a través de membranas estériles que se incubaron en medios nutritivos para demostrar la ausencia de contaminantes.
La membrana con la muestra filtrada se incubó en Agar selectivo Slanetz y Bartley (Biokar^{R}) durante 48 hs a 35 ± 2 °C. Para realizar el recuento se consideraron colonias de color rojo-rosados, las cuales constituyeron la primera lectura de colonias sospechosas. Para confirmación del resultado se transfirió cada membrana a otra placa con medio Agar Bilis Esculina Azida (Britania^{R}), que se incubó 3 hs. a 44 Cº. En este medio se contabilizaron aquellas colonias atribuidas a enterococos, identificadas por su coloración oscura como consecuencia de la hidrólisis de la esculina. Los resultados se expresaran como unidades formadoras de colonia (UFC) en 100 mL de la muestra [14].

Técnica de Tubos Múltiples o método del Número más Probable (NMP): Coliformes Totales y *Escherichia coli*

Se aplicó el método del NMP conforme recomendaciones del Standard Methods for the examination of wáter and wastewater 22 ed. Para ello, e inmediatamente luego de asegurar la correcta homogeneización de cada muestra, se usaron tres diluciones de la muestra, tomando por triplicado los siguientes volúmenes: 10 mL, 1 mL y 0,1 mL [13]. Las submuestras se inocularon en tubos con caldo Lauryl Sulfate con MUG (Fluorocult, Merck ^{R}) y campana de Durham. Conforme estandarización del método, las alícuotas de 10 ml se inocularon en tubos conteniendo 10 ml de caldo a doble concentración, mientras que el resto de las submuestras se inocularon en tubos conteniendo 5 ml de caldo a simple concentración cada uno. Los tubos se incubaron durante 48 hs a 35 ± 2 °C, hasta realizar la primera lectura e interpretación de resultados. Se consideró tubo positivo para determinar NMP de coliformes aquél que presentase turbidez y gas retenido en la campana de Durham. Se consideró tubo positivo para determinar *E. coli* aquél que cumpliera los requisitos para determinar presencia de coliformes y a su vez demostrara emisión de fluorescencia bajo la iluminación con lámpara UV (presencia de fluorocromo libre por acción de la enzima β glucuronidasa) y producción de Indol mediante el uso de reactivo de Kovacs. La interpretación de los resultados se realizó usando una tabla de tubos múltiples estandarizada para muestras de 100 ml, con una confianza del 95 % [15].

RESULTADOS

Los valores de NMP de *E. coli* alcanzaron máximos de 1100 NMP/100 ml (Gráfico 1), superando el punto de corte de las Guías Canadienses de Calidad de Agua (NMP > 240) en verano y otoño.

Los valores de UFC de enterococos alcanzaron valores máximos de 450 UFC/100 ml en otoño, sin embargo en todo el período estudiado los resultados obtenidos superaron el valor de 33 UFC/100 establecido como punto de corte por la OMS y la Sub Secretaria de Recursos Hídricos de la Nación [16].

En primavera e invierno solamente el recuento de Enterococos superó los limites guías, con valores entre 35 y 210 UFC/100 ml respectivamente, indicando riesgo ambiental por contaminación fecal. En cambio, para este período del año los resultados de NMP de *E. coli* no identificaron riesgo al encontrare por debajo de los valores guía para este indicador.

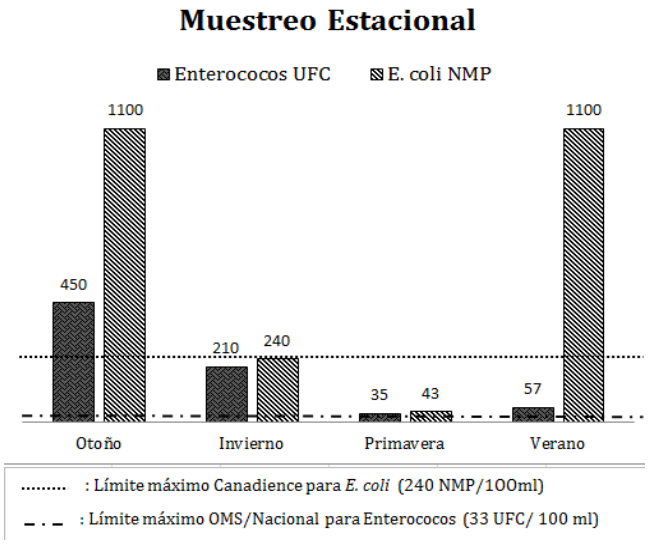


Grafico 1. Distribución estacional de indicadores microbiológicos de contaminación fecal

DISCUSIÓN

El consenso general destaca la necesidad de realizar de tres a cinco repeticiones de muestreo para alcanzar un valor representativo correspondiente a un momento determinado, pudiendo así promediar los resultados [15]. Para este estudio se realizó un solo muestreo en cada momento, razón por la cual podría considerarse que los resultados obtenidos no representan al sitio estudiado. Sin embargo, la coincidencia en los resultados obtenidos por metodologías diferentes para los periodos de otoño y verano así la observación de valores superiores al límite máximo sugerido por OMS para enterococos para todas las estaciones del año permite suponer que los resultados obtenidos son representativos. No obstante ello, para que los resultados cuenten con el rigor de una metodología estandarizada, se debería continuar el estudio microbiológico del sitio realizando replicas para poder hacer los promedios y desviaciones en cada momento de análisis de resultados.

Aunque diversas fuentes sostienen que el sector estudiado no está impactado, nuestros resultados manifiestan la presencia de un considerable nivel de degradación. Estas diferencias podrían explicarse por la selección de distintos métodos de muestreo. La diferencia baja y pleamar representa para el nivel del rio un nivel de 3,69 metros de agua. El muestreo en pleamar podría generar un efecto dilutorio, capaz de explicar la diferencia entre los resultados públicos y aquellos obtenidos por nuestro grupo de trabajo, que ha optado por el muestreo en baja mar considerando que de esta manera los resultados son más representativos.

Los Enterococos son microorganismos Gram positivos, con una gruesa pared bacteriana y una forma esférica tipo coco, que le aporta gran resistencia a fuerzas físicas incluyendo la variación en la presión osmótica. En cambio, *Escherichia coli* posee menor resistencia a variaciones osmóticas al tratarse de bacilos Gram negativos con una pared bacteriana significativamente más reducida que los enterococos. En el estuario de Río Negro coexisten diferentes situaciones que podrían influir en su salinidad, entre las que destacan la disminución del nivel de lluvias y nevadas en la zona de origen, el aumento de evaporación del caudal de río generado por las represas El Chocón, Arroyito, Alicurá, Piedra del Águila y Pichí Picún Leufu, que sumandos al efecto de las mareas podrían generar un ambiente desfavorable para *Escherichia coli.* Esta razón podría explicar la mayor supervivencia de enterococos y por consiguiente su utilidad como indicadores de contaminación fecal para la zona de estudio.

La técnica de filtración por membrana presenta varias ventajas: demanda poco tiempo operativo, es exacta y confiable ya que permite cuantificar el microorganismo de interés en la totalidad de los 100 ml de muestra estudiada. En cambio, el MNP demanda más tiempo de trabajo en laboratorio, y los resultados obtenidos se basan en una estimación a partir del procesamiento de una alícuota de 33,3 ml de la muestra infiriendo el resultado en 100 ml totales. Se comprobó que las características microbiológicas y físicas del estuario permiten adoptar la técnica de filtración por membrana para Enterococos utilizando como medio de cultivo Slanetz y Bartley sin mayor inconveniente. Se pudo identificar y contar el número de colonias de enterococos sin interferencia de microorganismos acompañantes.

La presencia de un elevado nivel de solidos suspendidos puede constituir un inconveniente para la adopción del método de filtración por membrana. En estudios realizados en otros sectores del estuario más cercanos a la desembocadura (datos no publicados) la cantidad de sólidos suspendidos fue un limitante para la aplicación de este método, sin embargo en el sector

estudiado la cantidad de solidos suspendidos no impidieron filtrar la totalidad de la muestra; estos resultados demuestran que es factible utilizar es método de filtración de membrana en reemplazo o paralelamente al NMP.

En el muestreo de otoño se observaron los mayores recuentos de enterococos (450 UFC/100 ml), que superaron en más de trece veces el valor límite establecido por la OMS (33 UFC/100 ml). Esto puede estar relacionado directamente con un periodo de fuertes lluvias días antes de dicho muestreo. Como consecuencia de las características de urbanización, sistema y estado de conducción de aguas pluviales, y estado de la red cloacal, ante la ocurrencia de fuertes lluvias se generan desbordes cloacales que son colectados por la red pluvial y descargan directamente en el río. Para verificar si existe contaminación cruzada entre líquidos cloacales y la red pluvial, se plantea la necesidad de realizar nuevos estudios comparando variables climáticas con los recuentos de indicadores de contaminación fecal. Los resultados de estos estudios serían de gran valor para la toma de medidas correctivas por los organismos responsables del manejo de los recursos hídricos.

El aumento de la población de la ciudad de Viedma observado en las últimas décadas supera la capacidad receptiva de su planta depuradora de líquidos cloacales [17], pudiendo ocurrir lo mismo en la localidad vecina de Carmen de Patagones. Esta situación podría explicar al menos parcialmente los elevados valores de bacterias indicadoras de contaminación fecal observados en la zona de estudio. Considerando la estrecha relación que la población de Viedma tiene con el agua del estuario, particularmente el uso recreativo durante el período estival, los resultados obtenidos en este trabajo deberían alertar a las autoridades sanitarias sobre los riesgos que esto implica, sobre todo en fracciones de la población más vulnerables como los niños.

CONCLUSIONES

No se encontraron limitantes para aplicar el método de filtración de membrana en el estudio de indicadores de contaminación fecal para la zona investigada: las características físicas y microbiológicas del agua proveniente del punto muestreado permitieron la normal aplicación de este método para el estudio de enterococos.

Los indicadores estudiados mostraron un comportamiento parcialmente diferente durante el período de evaluación: mientras *E coli* manifestó intermitencia en relación a los valores límites para uso recreativo del agua, los enterococos resultaron más estables, sugiriendo la conveniencia en su adopción para el control microbiológico de este estuario.

Los resultados obtenidos dan evidencias de degradación de la calidad del agua del Estuario del río Negro.

REFERENCIAS

[1]. ©FAO2001-2015. Fisheries Topics: Ecosystems. Coastal and marine ecosystems. Topics Fact Sheets. **Texto de Peter Manning.** In: *Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO* [en línea]. Roma. Actualizado 31 October 2001. [Citado 27 August 015].http://www.fao.org/fishery/topic/3542/es

[2] U.S.EPA (2012). United States Environmental Protection Agency. Water Estuaries and Coastal Watersheds. http://water.epa.gov/type/oceb/nep/about1.cfm

[3]. Píccolo y Perillo, 1997. Their Geomorphology and Dynamic. Instituto Argentino de Oceanografia. Bahía Blanca, Argentina
[4]. Salibián A., Ferrari L. (2006). Calidad del agua del Río Reconquista, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Ingeniería Sanitaria y Ambiental 87: 65-71.
[5]. AIC (2006). Autoridad Interjurisdiccional de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro. Calidad del agua del Río Negro.
[6]. DPA (2010). Departamento Provincial del agua- Provincia de Rio Negro. Calidad del agua del Rio Negro 2007-2010.
[7]. WHO (1994). Collaborating Centres In Occupational Health. Beijing, China.
[8]. Prüss, A. (1998). Review of epidemiological studies on health effect from exposure to reacreational water. Inter. J. Epidemiol. 27: 1-9.
[9]. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2003). Desarrollo de Niveles Guía Nacionales de Calidad de Agua Ambiente correspondientes a *Escherichia coli*/ Enteroccocos. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Buenos Aires, Argentina.
[10].Folabella A.M., Escalante A.H., Deza A., Perez Guzzi I., Zamora A.S. (2006). "Indicadores bacterianos de calidad de agua recreacional en la Laguna de Los Padres (Buenos Aires, Argentina)".Trabajo presentado en 1° Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, Argentina.
[11]. Suares Pita, M. (2002). "Tendencia actual del estreptococo como indicador de contaminación fecal". Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología. Ciudad de la Habana, Cuba. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. Volumen Nº 40.
[12]. Abrameto M., Dapeña C., Aldalur B., Caro A.,. Cecchini V., Fernandez C., Szmulewicz M., Travaglio M., Molina L., Abate S. (2013). "Caracterización química e isotópica preliminar del agua superficial y subterránea en el Valle inferior del río Negro, Argentina".Aguas Subterraneas recurso estratégico Tomo II. Pp: 43-51. Edulp. ISBN 978-987-1985-03-6.
[13]. APHA, AWWA, WEF, 2005 Standard Methods. For the examination of water & wastewater. Centennial Edition.
[14]. Couillette A.D; Noble R.T. (2008). Impacts of rainfall on the water quality of the Newport River Estuary (Eastern North Carolina, USA). Journal of water and health.IWA Publishing.
[15]. APHA, AWWA, WPCF; Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales; Leone S. Clesceri y col. Ed. Diaz de Santos, S.A. 20th ed.
[16]. República Argentina
Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación
Niveles Guía Nacionales de Calidad de Agua Ambiente *Escherichia coli*/enterococos (2003). Desarrollos de niveles guías nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a *escherichia coli*/enterococos.
[17]. DPA-AIC (2013). Estudio, Evalucacion y lineamientos generales para la aplicación de las aguas residuales tratadas en San Carlos de Bariloche.

TRATAMIENTO DE DATOS EN LA ESCALA DE ABUNDANCIA/COBERTURA DE BRAUN-BLANQUET PARA EL ORDENAMIENTO DE LA VEGETACIÓN

Sergio Camiz[a], *Valério Pillar*[b], *Patricia S. Torres*[c]

[a]*Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, Roma, Italia*
[b]*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av.Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Brazil*
[c]*Facultad de Ciencias Agrarias, C.C. 14, Zavalla, Argentina*

e-mail: *sergio.camiz@uniroma1.it*

RESUMEN

El método para el estudio de la vegetación de Braun-Blanquet y su escala de abundancia/cobertura, han sido utilizados por numerosos científicos en el estudio de la vegetación mundial y es enorme la cantidad de información así generada. Sin embargo, en los últimos años se ha puesto en tela de juicio el hecho que la escala de Braun-Blanquet es ordinal y como tal no debe ser tomada como numérica (Podani 2006). En este trabajo analizamos una coenoclina simulada desde una función beta generalizada con el paquete R. El objetivo de este trabajo es comparar distintos tratamientos de los datos: su transformación a escalas numéricas y análisis con Componentes Principales, reducirlos a presencia/ausencia y usar Componentes Principales o Correspondencias simples, considerarlos en escalas categóricas y analizarlos con Correspondencias Múltiples o considerarlos ordinales y emplear coeficientes ordinales y Non Metric Multidimensional Scaling. Los planos de proyección de los diferentes métodos se comparan con un test de aleatorización procusteano. Se obtuvieron 2 ó 3 ejes significativos con los 10 análisis realizados. Se encontró que en general, no existen diferencias significativas en las distintas proyecciones si se comparan los ejes 1 y 2. Las soluciones más parecidas entre sí son las que se obtienen con el tratamiento ordinal de la escala y Non Metric Multidimensional Scaling, con presencia/ausencia y con la escala de van der Maarel considerada cuantitativa y analizadas con Componentes Principales y matriz de correlación. Por lo tanto se recomienda el tratamiento más sencillo (presencia/ausencia) para analizar datos de vegetación provenientes de un muestreo con la escala y el método de Braun-Blanquet.

Palabras Clave: abundancia/cobertura, Braun-Blanquet, ordenamiento, coenoclina, procusteano

INTRODUCCIÓN

J. Braun-Blanquet ha sido reconocido como el padre de la historia de la Ciencia de la Vegetación [1]. Sus dos obras más importantes [2, 3] han causado una gran influencia en la práctica de campo y en el pensamiento científico de la mayoría de los ecólogos de vegetación en Europa y en otras partes del mundo [4, 5]. La descripción y clasificación de la misma no puede ser evaluada correctamente sin hacer referencia a sus trabajos pioneros y los de sus colegas y seguidores, como los de la Escuela de Fitosociología de Zürich-Montpellier. Si bien se tiene al presente una gran cantidad de información sobre la vegetación del mundo, mucha de la cual se ha obtenido con la aplicación del método de Braun-Blanquet, algunos autores han reconocido que la metodología presenta problemas [6, 1]. Estas dificultades aparecen cuando se analizan numéricamente datos de vegetación obtenidos con dicho método.

El método tradicional para registrar observaciones de campo en Fitosociología es a través de una muestra de "censos". Un censo básicamente es una lista de especies vegetales observadas en una parcela junto con una estimación de su abundancia/cobertura, abundancia, cobertura o algún otro indicador de su importancia. La conocida escala de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet toma 7 valores y se puede observar en la Tabla I. Obviamente, la presencia de símbolos en la escala (+ y (+)) excluye inmediatamente la posibilidad de realizar cálculos matemáticos, por lo tanto se han sugerido varios procedimientos para convertir los valores a otras escalas que contengan solamente números [7]. Entre ellas tenemos la de los valores medios de las clases de porcentajes de cobertura de Braun-Blanquet, la de abundancia/cobertura de van der Maarel, la de Daubenmire, la de Hult-Sernander, la de Domin, la de Doing, la de Barkman, etc. [7]. Las dos primeras escalas se encuentran en la Tabla I:

Tabla I. comparación de las escalas de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet, de los valores medios de la escala de cobertura de Braun-Blanquet, de abundancia/cobertura de van der Maarel y variables categóricas con 7 y 2 valores distintos de la vegetación.

Escala de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet	Valores medios de la escala de porcentajes de Braun-Blanquet	Escala de abundancia de van der Maarel	Variable categórica con 7 valores distintos	Variable categórica con 2 valores distintos
5	87,5	9	9	3
4	62,5	8	8	3
3	37,5	7	7	3
2	17,5	5	5	2
1	5	3	3	2
+	0,1	2	2	2
(+)	0,01	1	1	2

Estas transformaciones resuelven el problema de los símbolos, sin embargo, de acuerdo a Podani [1], la nueva escala así obtenida es ordinal y como tal, ciertas operaciones con dichos valores son estrictamente inadmisibles.

De acuerdo a Podani [1], la mejor solución matemática del problema es elegir un coeficiente de similitud/disimilitud compatible con datos ordinales y usar métodos ordinales de análisis de datos. Por ejemplo recomienda el coeficiente γ de Goodman & Kruskal, el coeficiente ζ de Kendall [8] ó la medida de discordancia de Podani [9] y como método de análisis de datos Non Metric Multidimensional Scaling [10]. Ricotta & Avena [11], contrariamente a lo manifestado por Podani [1], sostienen que el uso de métodos multivariados convencionales (por ejemplo Análisis de Componentes Principales) para evaluar datos provenientes de dichas escalas (columnas 2 y 3 de la Tabla I) no representa un error metodológico, ya que implica un ajuste de una "distancia topológica" entre especies. Esta afirmación no tiene ningún sentido pues en topología la noción de distancia no existe ni tampoco tiene sentido porque no sería invariante.

Otra solución es utilizar los datos como valores de presencia/ausencia, cuyo análisis no posee problemas computacionales, sin embargo, esta simplificación implica una pérdida de información [1]. Se trata de la solución recomendada por Camiz [6], pues permite tratar tablas con vegetación muestreada por diferentes autores sin riesgo de sesgo debido a la diferente estimación de la cobertura por parte de ellos.

Una solución intermedia consiste en considerar la escala de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet como una variable categórica, y aquí tenemos varias posibilidades: considerar todas las categorías (siete más el cero) o agrupar las categorías en dos grandes grupos más el cero (columnas 4 y 5 de la Tabla I). Como programa de análisis para estos datos se sugiere el Análisis de Correspondencias Múltiples [12] que se puede correr con el paquete *SPAD-N* [13].

El uso de la escala de abundancia/cobertura de van der Maarel en el análisis de datos de vegetación ha sido más que satisfactorio [14, 15, 16, 17] y es más apropiado que la escala de los

valores medios de las clases de porcentajes de cobertura de Braun-Blanquet. En un trabajo anterior comparamos cuatro tipos de tratamiento para datos tomados en la escala de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet: considerarlos nominales, ordinales, presencia/ausencia o de razón, con métodos de ordenamiento apropiados a los mismos y con un mismo conjunto de datos de vegetación con estructura conocida [18]. Encontramos que no existe ninguna ventaja en analizar una matriz de datos de vegetación con la escala de van der Maarel y Análisis de Componentes Principales estandarizado, con respecto al análisis con presencia/ausencia, pues se alcanza el mismo resultado, es más sencillo y no se corre el riesgo de sesgo [19]. No obstante para afirmar la superioridad de este análisis será necesaria una experimentación más profunda, con otros conjuntos de datos e incluyendo el tratamiento de datos simulados.

El objetivo de este trabajo es comparar distintos tratamientos de datos de una coenoclina simulada: su transformación a escalas numéricas y análisis con Componentes Principales y Correspondencias, considerarlos en escalas categóricas y analizarlos con Correspondencias Múltiples, reducirlos a presencia/ausencia y analizarlos con Componentes Principales y Correspondencias Simples y considerarlos ordinales y emplear coeficientes ordinales y Non Metric Multidimensional Scaling.

MÉTODOS

Se simuló una matriz de datos de 30 unidades muestrales por 60 taxas desde una función beta generalizada utilizando el método de Minchin [20]. Así se simularon abundancias de las especies para las curvas de respuesta de las especies a un gradiente ambiental hipotético. Esto fue realizado con el programa *coenocliner* del paquete *R* [21].

La matriz obtenida presentaba valores de abundancia de especies desde 0 a 91, por lo tanto se construyeron 9 intervalos de confianza con una amplitud Δ=10,1 y se asignaron valores de 0 a 9 a las abundancias de especies que caían en dichos intervalos. A los valores 4, 5 y 6 se los clasificó con el valor 5 como en la escala de abundancia/cobertura de Van der Maarel [7], en la cual si bien los valores no son equidistantes, expresan las diferencias en el comportamiento de las especies en una forma más eficiente, reproduciendo la ingeniosa y original idea de Braun-Blanquet. A esta la llamamos *matriz VDM*. Desde esta última construimos una segunda matriz transformando los valores a la escala de los valores medios de las clases de porcentajes de cobertura de Braun-Blanquet (*matriz BB*), y una tercera transformando los datos a presencia/ausencia (*matriz PA*), perdiendo la información de la importancia de la especie en el censo. Las tres matrices de datos fueron sometidas a Análisis de Componentes Principales (*PCA*) [22, 23] empleando una matriz de correlación, utilizando el paquete de programas *PC-ORD* [24]. El mismo paquete se utilizó para analizar la *matriz PA* y la *matriz VDM* con Análisis de Correspondencias (*CA*), produciendo un Análisis de Correspondencias Simples en el primer caso (*SCA*).

Los valores originales de la escala combinada de Braun-Blanquet también fueron transformados a dos escalas nominales, una que tiene en cuenta las 7 categorías más el cero (matriz *N8*) y otra que agrupa las categorías en dos grandes grupos más el cero (matriz *N*3) (Tabla I). Como programa de análisis para estos datos se utilizó Análisis de Correspondencias Múltiples (*MCA*) con el paquete *FactoMineR* [25] del programa *R*.
Para el tratamiento de los datos como provenientes de una escala ordinal, como fuera sugerido por Podani [1], se utilizaron los coeficientes γ de Goodman & Kruskal y ζ de Kendall [8] y la medida de discordancia de Podani [9] y como método de análisis de datos el sugerido por Podani [1]: Non Metric Multidimensional Scaling (*MDSC*), utilizando el programa *SYNTAX 2000* [26].

Para la comparación de los métodos, tuvimos en cuenta las dos primeras coordenadas de los 30 censos simulados resultantes de los 10 métodos aplicados. Con dichas coordenadas construimos una nueva matriz de datos a la cual le aplicamos *PCA* and Clasificación de Factor Jerárquica [27]

con el programa *Clahfac*, para tener una idea general de las relaciones entre los diferentes tratamientos de la escala y métodos de análisis.

También comparamos las configuraciones de los censos en los planos definidos por los métodos multivariados con Análisis Procrusteano [29, 30] utilizando el test de aleatorización procrusteano del paquete *Vegan* [31] del programa *R*, junto con la correlación Procrusteana, que es la raíz cuadrada del complemento de 1 de la suma de las distancias al cuadrado entre las unidades de las dos representaciones comparadas. Como en el primer caso se realiza un número grande de tests se ajusta la probabilidad de error tipo I por Bonferroni [32].

Nosotros limitamos nuestra atención a las dos primeras coordenadas, ya que al trabajar con una coenoclina esperamos un gradiente principal (curvilíneo) a lo largo del cual los censos y las especies pueden ser ubicados, con su ajuste con respecto al gradiente en la segunda dimensión de acuerdo al mayor o menor rango de las especies y la presencia de las mismas en diferentes posiciones a lo largo del gradiente para los censos [28]. Por lo tanto, para tales datos, no consideramos de interés las siguientes dimensiones, que representan otras desviaciones menos fáciles de interpretar.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Considerando los dos primeros conjuntos de coordenadas de los 10 métodos utilizados, obtenemos la matriz de correlación de la Tabla II, una vez que ajustamos el signo de algunos conjuntos para adecuarse con los otros y cambiamos las coordenadas resultantes del *PCA* con Braun-Blanquet (en este único caso, las dos primeras componentes principales tuvieron importancia reversa).

Tabla II. Coeficientes de correlación entre las dos primeras coordenadas de los 10 métodos aplicados a una coecoclina de 30 censos por 60 especies

	pcvm	pcpa	pcbb	cavm	capa	msgk	mske	mspo	mca8	mca3
pcvm	1.000									
pcpa	0.9936	1.000								
pcbb	0.8350	0.8194	1.000							
cavm	0.8969	0.9146	0.7667	1.000						
capa	0.8692	0.8935	0.7403	0.9924	1.000					
msgk	0.9536	0.9643	0.7662	0.8961	0.8795	1.000				
mske	0.9848	0.9958	0.7993	0.9296	0.9114	0.9703	1.000			
mspo	0.9879	0.9976	0.8052	0.9174	0.8994	0.9681	0.9978	1.000		
mca8	0.9748	0.9664	0.7437	0.8351	0.8086	0.9283	0.9551	0.9618	1.000	
mca3	0.9948	0.9998	0.8187	0.9113	0.8898	0.9635	0.9948	0.9971	0.9690	1.000
	pcvm	pcpa	pcbb	cavm	capa	msgk	mske	mspo	mca8	mca3

Referencias:

pcvm: PCA aplicado a la matriz en la escala de abundancia/cobertura de van der Maarel (matriz VDM)

pcpa: PCA aplicado a la matriz de presencia-ausencia (matriz PA)

pcbb: PCA aplicado a la matriz en la escala de los valores medios de las clases de porcentajes de cobertura de Braun-Blanquet (matriz BB)

cavm: CA aplicado a la matriz en la escala de abundancia/cobertura de van der Maarel (matriz VDM)

capa: CA aplicado a la matriz de presencia-ausencia (matriz PA)

msgk: MDSC aplicado a la matriz de valores ordinales utilizando el coeficiente de Goodman & Kruskal (matriz VDM)

mske: MDSC aplicado a la matriz de valores ordinales utilizando el coeficiente de Kendall (matriz VDM)

mspo: MDSC aplicado a la matriz de valores ordinales utilizando el coeficiente de discordancia de Podani (matriz VDM)

mca8: MCA aplicado a la matriz de 7 valores nominales más cero (matriz N8)

mca3: MCA aplicado a la matriz de 2 valores nominales más cero (matriz N3)

Las correlaciones son todas altas y significativas. En la Tabla III se observan los resultados del *PCA* aplicado a la Tabla II, esto es, la secuencia de autovalores y la información relevante con respecto a la clasificación jerárquica realizada a los mismos datos con el programa *Clahfac*.

Tabla III. Autovalores resultantes del PCA e información de la clasificación jerárquica realizada con Clahfac a los datos de la Tabla I

N	eigen	%cum.in.	No	Ngr	1	2	ng	index	%inertia	%cum.in.	I eig	%1par.in.	%2par.in.
1	**9.232899**	**92.32899**	11	9	2	10	2	0.00018	0.00183	0.00183	1.999817	99.99084	0.00916
2	0.331187	95.64086	12	8	7	8	2	0.00220	0.02199	0.02382	1.997807	99.89008	0.10992
3	0.328086	98.92172	13	7	11	12	4	0.00613	0.06126	0.08507	3.991493	99.78732	0.21268
4	0.063724	99.55896	14	6	4	5	2	0.00757	0.07567	0.16074	1.992433	99.62165	0.37835
5	0.278655	99.83762	15	5	1	13	5	0.01382	0.13822	0.29897	4.977670	99.55340	0.44659
6	0.008759	99.92521	16	4	15	9	6	0.05360	0.53598	0.83494	5.924073	98.73455	1.26546
7	0.004075	99.96597	17	3	16	6	7	0.06066	0.60660	1.44154	6.863413	98.04876	1.95124
8	0.002068	99.98665	18	2	17	14	9	0.30340	3.03402	4.47556	8.552444	95.02716	4.97284
9	0.001247	99.99913	19	1	18	3	10	0.32004	3.20044	7.67600	**9.232400**	**92.32400**	7.67600
10	0.000868	100.00000	sum of the indexes					0.76760					

La primera columna representa el orden de los autovalores de *PCA*, la segunda su valor, correspondiendo a un décimo del porcentaje de inercia total (desde que en este estudio hay 10 variables), la tercera el porcentaje acumulado, luego el número de sequencia de los nodos de la jerarquía, el número de grupos correspondiente a cada nivel, los dos nodos agrupándose, el número de unidades en el grupo formado, el índice de la jerarquía (correspondiente al segundo autovalor de los nodos de *PCA*), la inercia, la inercia acumulada, el primer autovalor de los nodos de *PCA*, la correspondiente inercia y la inercia correspondiente al segundo autovalor, que es el índice jerárquico.

Observando la Tabla III, dos resultados importantes se desprenden de la misma: el gran peso de la primer componente principal de *PCA* y de la última variable representativa de *Clahfac*, 9.2329 y 9.2324, que representan 92.329% y 92.324% de la inercia total, respectivamente, indicando el mayor grado de acuerdo entre los métodos estudiados. Aún más, los dos componentes siguientes, así como los siguientes nodos, contribuyen casi un 3% cada uno y los restantes mucho menos. Si consideramos el índice de *brokenstick* [33] para evaluar la significancia de estos valores, encontramos que solamente el primero merece ser tenido en cuenta. En la Figura 1, se representan los métodos sobre el círculo de correlación correspondiente a *PCA*.

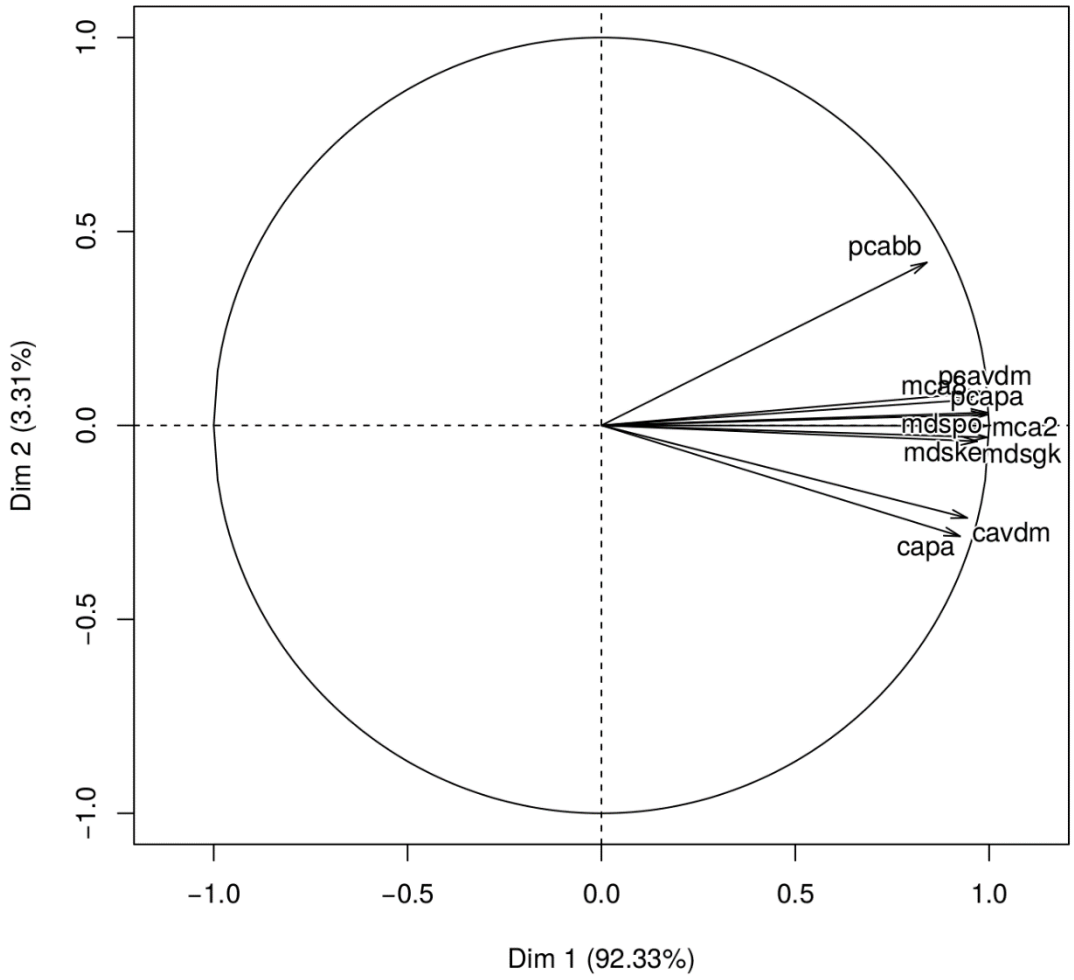


Figura 1. Representación de los 10 métodos de escalamiento, usados para analizar la coenoclina simulada, sobre el círculo de correlación de *PCA* corrido sobre los dos primeros conjuntos de coordenadas producidos por ellos. Para Referencias de las abreviaturas de los métodos empleados ver Tabla II

Admitiendo tener en cuenta los dos primeros componentes, resultan 3 grupos de métodos, en perfecto acuerdo con el dendrograma resultante de *Clahfac* que se observa en la Figura 2:

```
-1.58E-02    5.46E-02    1.25E-01    1.95E-01    2.66E-01    3.36E-01
       -0---.-----+-----.-----+-----.-----+-----.-----+-----.-----+
pcvm   ******
           15*****
pcpa   ***  *     *
         11 *     *
mca3   **** *     *
           13*    *
mske   ****       *
           12     *
mspo   ****       *
                  16*
mca8   ********** *
                    17*************************************
msgk   **************                                     *
                                                          18**
cavm   ****                                               *  *
           14*************************************************  *
```

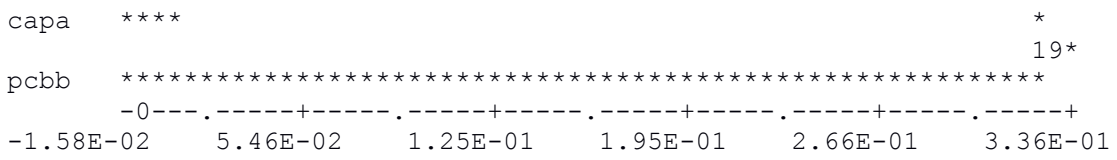


Figura 2. Clasificación de los 10 métodos de escalamiento, usados para analizar la coenoclina simulada, con Clahfac corrido sobre los primeros dos conjuntos de coordenadas producidos por ellos. Para Referencias de las abreviaturas de los métodos empleados ver Tabla II

Es más que evidente que resultan tres grupos (aunque con poca diferencia entre ellos), con *PCA* sobre Braun-Blanquet en uno, los dos *CA* formando otro grupo y todos los demás métodos agrupados juntos. Es interesante observar que todos los métodos difieren más de *PCA* corrido con los porcentajes promedio de las clases de cobertura de Braun-Blanquet: el método menos usado. Además sus correlaciones con todos los otros son las más bajas, siendo la menor 0,74 y la mayor no superando a 0,84.

Los test procrusteanos entre las dos primeras coordenadas de los 10 métodos fueron todas altamente significativas ($p<0,001$), aún corregidos por Bonferroni. En la Tabla IV se presentan las correlaciones Procrusteanas entre los pares de métodos analizados. Ellas son más altas que las correlaciones de Pearson, estas últimas calculadas considerando los pares de coordenadas como un vector único en los análisis previos. Esto se puede interpretar en el sentido que ambas coordenadas participan simultáneamente en las configuraciones analizadas (en las cuales se espera ver un efecto arco), de manera que consideradas individualmente pueden resultar correlaciones más bajas.

Tabla IV. correlaciones Procrusteanas entre las dos primeras coordenadas de los 10 métodos empleados para analizar una coenoclina simulada. Para Referencias de las abreviaturas de los métodos empleados ver Tabla II

	pcvm	pcpa	pcbb	cavm	capa	msgk	mske	mspo	mca8	mca3
pcvm	1.000									
pcpa	0.9937	1.000								
pcbb	0.9806	0.9571	1.000							
cavm	0.9176	0.9356	0.8651	1.000						
capa	0.8609	0.8867	0.8008	0.9922	1.000					
msgk	0.9541	0.9651	0.9110	0.9263	0.8920	1.000				
mske	0.9849	0.9958	0.9404	0.9517	0.9123	0.9709	1.000			
mspo	0.9879	0.9977	0.9448	0.9399	0.9033	0.9687	0.9978	1.000		
mca8	0.9861	0.9801	0.9758	0.9808	0.8266	0.9379	0.9672	0.9739	1.000	
mca3	0.9948	0.9998	0.9602	0.9328	0.8834	0.9641	0.9948	0.9971	0.9816	1.000

Nuestras conclusiones son las siguientes: las 10 combinaciones de métodos y recodificación de los datos examinadas no dan resultados significativamente diferentes para merecer una discusión de larga data entre los correspondientes autores. Esto permite, por un lado, considerar la codificación promedio de Braun-Blanquet en caso que uno considere confiable la estimación de la cobertura en el campo. Por otro lado, dado que todos los otros métodos son igualmente probables, sería razonable limitar nuestra atención a los métodos más simples. También se pueden considerar otros aspectos que pueden ser de relevancia en la elección: i) la habilidad para encontrar especies asociadas, típico de *PCA* [34]; ii) el efecto herradura reducido a un arco en CA [28]; iii) la habilidad para representar el pattern de niveles de *MCA*, una interesante característica que merece ser tenida en cuenta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo durante la estancia de Sergio Camiz en el Laboratorio de Ecología Quantitativa, del Centro de Ecología de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (*UFRGS*), con una beca especial de Investigador visitante del Programa de Movilidad Científica Brasilera "Ciências sem Fronteiras" (Número: 401345/2014-9).

REFERENCIAS

[1] J. Podani, 2006. Braun-Blanquet's legacy and data analysis in vegetation science, *Journal of Vegetation Science*, 17, 113-117.
[2] J. Braun-Blanquet, 1928. *Pflanzensoziologie. Grundzuge der Vegetationskunde*, Springer, Wien, AT.
[3] J. Braun-Blanquet, 1932. *Plant Sociology*, Mc Graw-Hill, New York.
[4] D. Müller-Dombois, H. Ellenberg, 1974. *Aims and methods of vegetation ecology*, John Wiley & Sons, New York.
[5] K. Fujiwara, 1987. *Aims and methods of phytosociology or "vegetation science". Plant ecology and taxonomy*, The Kobe Geobotanical Society, Kobe, JP.
[6] S. Camiz, 1993, *Scopi e finalità dell'analisi della vegetazione e relativi schemi di rilevazione campionaria*. In S. Zani (ed.), *Metodi statistici per le analisi territoriali*. Milano, Franco Angeli, Studi urbani e regionali, 301-322.
[7] E. van der Maarel, 1979. Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity, *Vegetatio*, 39(2), 97-114.
[8] J. Podani, 2000. *Introduction to the exploration of multivariate biological data*, Backhuys Publishers. Leiden, The Netherlans.
[9] J. Podani, 1997. A measure of discordance for partially ranked data when presence/absence is also meaningful, *Coenoses*, 12(2-3), 127-130.
[10] J.B. Kruskal, 1964. Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit of a non Metric Hypothesis, *Psychometrika*, 29(1), 1-27.
[11] C. Ricotta, G. Avena, 2006. On the evaluation of ordinal data with conventional multivariate procedures, *Journal of Vegetation Science*, 17, 839-842.
[12] J.P. Benzécri *et coll.*, 1973-82. *L'Analyse des données*, Dunod, Paris.
[13] L. Lebart, A. Morineau, T. Lambert and P. Pleuvret, 1991. *SPAD-N – Manuel de référence*. CISIA, Paris.
[14] S.I. Boccanelli, E.F. Pire, P.S. Torres and J.P. Lewis, 1999. Cambios en la vegetación de un campo abandonado después de un cultivo de trigo, *Pesq. Agropec. Bras.*, 34(2), 151-157.
[15] N.J. Carnevale, P.S. Torres, S.I. Boccanelli and J.P. Lewis, 1987. Halophilus communities and species distribution along environmental gradients en SE Santa Fe province, Argentina, *Coenoses* 2 (2), 49-60.
[16] E.A. Franceschi, P.S. Torres and J.P. Lewis, 2005. Recovery and stability of Parana river floodplain grassland after eighteen years from a catastrophic flood, *Community ecology* 6(2), 209-217.
[17] E.A. Franceschi, P.S. Torres and J.P. Lewis, 2010. Diversidad de la vegetación durante su recuperación tras una creciente extraordinaria del Río Paraná Medio (Argentina), *Biología Tropical*, 58(2), 707-716.
[18] N.J. Carnevale, P.S. Torres, 1990. The relevance of physical factors on species distributions in inland salt marshes (Argentina), *Coenoses* 5 (2), 113-120.
[19] P.S. Torres, S. Camiz, 2014. Cómo tratar la escala de abundancia/cobertura de Braun-Blanquet para el ordenamiento de la vegetación? Actas trabajos completos E-ICES 9. CNEA pp. 370-385.
[20] P.R. Minchin, 1987. An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination. *Vegetatio* 69: 89-107.
[21] G.L. Simpson, 2014. Coenocliner: a coenocline simulation package for R, 14 pp.

[22] H. Hotelling, 1933a. Analysis of a complex of statistical variables into principal components, *Journal of Educational Psychology*, 24, 417-441.
[23] H. Hotelling, 1933b. Analysis of a complex of statistical variables into principal components, *Journal of Educational Psychology*, 24, 498-520.
[24] B. McCune, M.J. Mefford, 2011. *PC-ORD Multivariate Analysis of Ecological Data*, version 6, MjM Software Design. Gleneden Beach, OR.
[25] S. Lé, J. Josse, F. Husson, 2008. FactoMineR: an R Package for Multivariate Analysis, *Journal of Statistical Software*, Vol.25, Issue 1: 1-18.
[26] J. Podani, 2001. *SYN-TAX 2000. Computer programs for data analysis in Ecology and Systematics*. User's manual, Scientia. Budapest, HU.
[27] J.J. Denimal, 2007. Classification Hiérarchique Optimisée d'un tableau de mesures. *Revue de Statistique Appliquée*, **148**(2), 29-61.
[28] S. Camiz, 2005. The Guttman Effect: its Interpretation and a New Redressing Method, *Τετραδια Αναλυσησ Δεδομενων (Data Analysis Bulletin)*, 5, 7-34.
[29] P. Legendre, L. Legendre, 1998. *Numerical Ecology*, Elsevier. Amsterdam, NL.
[30] P.R. Peres-Neto, D.A. Jackson, 2001. How well do multivariate data sets match? The advantages of a Procrustean superimposition approach over the Mantel test, *Oecologia*, 129, 169-178.
[31] J. Oksanen, 2013. Multidimensional Analysis of Ecological Communities in R: vegan tutorial, 43pp.
[32] B. McCune, J.B. Grace, 2002. *Analysis of Ecological Communities*, MjM Software Design. Gleneden Beach, OR.
[33] S. Frontier, 1976. Etude de la décroissance des valeurs propres dans une analyse en composantes principales : comparaison avec le modèle du bâton brisé. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 25, 67-75.
[34] I. Noy-Meyr, 1971. Multivariate Analysis of the Semi-arid Vegetation in South-Eastern Australia: Nodal Ordination by Component Analysis". *Proceedings of Ecological Society of Australia*, 6, 159-193.

PREDICTING POTENTIAL PLANT COMMUNITY COMPOSITION

Camiz S.[a], *Pillar V.D.*[b]

[a]*Dipartimento di Matematica Guido Castelnuovo, Sapienza Università di Roma, Italia*
[b]*Departamento de Ecología, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

e-mail: sergio.camiz@uniroma1.it

ABSTRACT

Predicting species composition in communities is challenging, for species coexistence is not only determined by shared ecological niches but also by more complicated assembly processes that involve the coexistence of different species in the same site. The description of species composition in vegetation plots may give a good idea of a community but not always species potentially present in a site may be found, not even their relative frequency may correspond to their potentials. This leads to the idea of potential community as the one that may be imagined to settle in a site, according to both ecological conditions and present species characteristics. Beals smoothing, trying to reduce the absences in a vegetation data table, contributes to this prediction, but, since it is proved that species traits are related to both ecological conditions and other plants presence in the same site, we thought that grounding prediction on traits may be a good choice. As several sets of traits may be considered for the purpose, the comparison of the results of different predictions may lead to an optimal choice of traits. An example on real data illustrates both the process and the results.

Keywords: Potential Communities, Species traits, Beal's smoothing, Fuzzy sets

INTRODUCTION

Predicting species composition in communities is challenging for it is not only determined by shared ecological niches but also by more complicated assembly processes leading to the coexistence or mutual exclusion of different species in the same site. The description of species composition in vegetation plots may give a good idea of a community but not always species potentially present in a site may be found, not even their relative frequency may correspond to their potentials. This leads to the idea of potential community as the one that may be imagined to settle in a site, according to both ecological conditions and present species characteristics. Thus, a problem in plant community ecology is to define such a potential community in a given site or sampling units. Further, the distinction between potential and actual community (once removed differences due to sampling) may allow to attribute their differences to either ecological conditions or interaction among concurrent species, or both.

The idea of potential community is not new: in [1] Beals tries to reduce the amount of absences in a data table by adding in a site species not actually present but somehow correlated with present ones. Indeed, we may ground our reflection on either the same or a similar procedure, to predict a plant community. This is a purely mechanical, somehow static, operation, in which each record of species composition in vegetation plots is enriched by species that are supposed to be potentially present there, due to their co-occurrence in other sites with species actually present there. Thus, Beals smoothing, trying to reduce the absences in a vegetation data table,

contributes to the prediction, but no explanation of the potential presence of species in a site is provided, apart their co-occurrence with the species present.
As an alternative, we may consider the traits of the species present in the site, that may favour/disfavour the species presence/abundance according to the ecological condition of the site [2]. As well we may assume that similar traits, well associated with site conditions, may favour the presence/growth of plants with these traits, regardless of the different species of belonging. Thus, we may enrich each record of species composition by species that are supposed to be potentially present there, due to their similarity with respect to traits with species actually present there [3]. Unlike the other, the definition of potential community based on their traits is somehow dynamic since it takes into account other information not present in the community data table but whose influence on it may be checked.

FORMALIZATION

As usual, we start with a metacommunity, that is a sample represented by a data table *A*, in which p rows represent species found in *n* sites (communities) corresponding to *A*'s columns, that represent communities. Each cell entry a_{ij} , $i = 1, \ldots, p$, $j = 1, \ldots, n$ is a measure of abundance of the species *i* in the community *j*. Note that each column of *A*, $\boldsymbol{A}_j$, $j = 1, \ldots, n$ is a (hope-fully random) vector extracted by the population of communities under study: thus, if the set of communities from which the sample *A* was extracted were homogeneous, all $\boldsymbol{A}_j$s would be realizations of the same random vector $\boldsymbol{\alpha}$, whose *p* components are the absolute frequencies of the species present in the population; thus, we may estimate $\boldsymbol{\alpha}$ through the average of the $\boldsymbol{A}_j$s and could be the potential community we are searching. Indeed, very seldom the metacommunity at hand may be considered homogeneous, thus this average may not be effective and we had rather search a potential community of reference for each of the observed ones. Thus, we may define potential community of one site as the one that may be present there, should not random events occur that favoured/disfavoured the presence of some species in respect to others, so that the actual community results different from the potential one, in particular for the absence of some species.

The issue of potential community seems present in plant community studies since long, in the past discussed within the problems raised by the presence of zeros in a data table. As such, it was already considered in the 1960's: "where a species does not occur, its absence may be a matter of chance only, the habitat being favorable for its occurrence. Alternatively, site conditions may be entirely unfavorable for the occurrence of the species. Since each unrecorded species is equally absent in the data, the zeros hide this part of the dialogue between species and habitat" (Swan [4], quoting [5]). In order to adjust his models to real data, Swan proposes to substitute zeros according to an average association of the species missing from a community with those present, considering all communities, and adjusting accordingly all cover values.

Now we have the problem to define such potential community, or better the set of potential communities that may correspond to the metacommunity data table A, that we may represent by a matrix of potential communities corresponding to the observed ones. At the moment, we see two alternatives: *i)* to estimate them through a method like the one proposed by [4]; and *ii)* through the similarity of traits. For this study, we are not really interested in species abundance, but only in relative composition of communities. Thus, we transform *A* to a matrix *W* of column profiles, that is proportions of abundance of each species in the specific community. We obtain profiles by dividing each entry by the total abundance of the *j*-th community, that is by the *j*-th column total: $W = (w_{ij} = a_{ij} / a_{.j})$, where the dot indicates summation on the corresponding index. Note that the matrix *A* may be a presence/absence one: should it be the case, *W* non-zero entries would equal the inverse of the number of species present in each community.

Beals smoothing

Swan [4] approach was criticized by Beals [1], which argued that his used scales of presence and absence were not comparable. Thus he proposed a better approach to potential community by defining a sociological favorability index generated entirely from presence/absence data, valid for both present and absent species in each community. Let A^0 a presence/absence species × communities data table. His smoothed matrix Y is obtained by calculating, for each species i, the average over all species in each community of the joint occurrences of i with all others, each divided by the frequency of the other, in formula:

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^{p} \left(\frac{a_{kj}^0}{a_{.j}^0} p(i \mid k) \right), \text{ with } \quad p(i \mid k) = \frac{\sum_{h=1}^{n} a_{ih}^0 a_{kh}^0}{a_{k.}^0}$$

the probability of the i-th species to be in a community conditioned by the k-th species presence. Beals smoothing has been used both by plant ecologists [6,7] and in applications (see [8] for citations). For our first estimation of potential communities, we shall adopt the modified formula proposed by [8], that generalizes Beals smoothing to the case in which A contains abundances. Indeed, distinguishing A (with abundance data) from A^0 (with presence/absence data) the conditional probabilities vectors become $\boldsymbol{p}(\mid k) = diag(A^0 A^{o\prime}))^{-1} A \boldsymbol{A}_k^{0\prime}$.

Traits and neighbourhoods

Let us now consider species traits, which are characteristics of species that one wishes to take into account, like leaf area, leaf thickness, plant height, seed size, etc. Its use may be of help in understanding the structure of the population at hand better than the catalog of present species. Indeed, for our purposes, we may think that the potential presence and the abundance of a species in a site may depend upon some traits the species has and that shares with others that were actually found in the same site [3]. Thus, we may use what we know about species traits to build a potential community matrix, analogous to the one we built by considering the simple species association.

Referring to the same population we are dealing with, we may consider the trait matrix B, in which the p rows represent species and the t columns represent traits. Each cell entry b_{ik} , $i = 1, \ldots, p, j = 1, \ldots, t$ is a trait level, depending upon the kind of the trait. Indeed, the choice of the traits depends upon the specific aims the investigation. Note that the matrix B is independent from the specific population at hand, since it only depends on the traits characteristic of a species. Thus, B usually may be built based on other databases or literature and according to the traits that the researcher thinks may be of interest [3]. An interesting use of B is to transform the community matrix W into a traits × communities one. For this task, B is a matrix composed of either presence/absence or quantitative characters or both. Indeed, the $t \times n$ matrix $T = B'W$, allows a more compact representation of the metacommunity in terms of traits [3]. Depending on the kind of data in B, the entries in T are either a relative frequency of a binary trait in a community or the weighted mean [9] of a quantitative trait of the species present in the community [3].

Additionally (and independently from the communities at hand), from B, a similarity (symmetric) $p \times p$ matrix S among species may be built, by using any similarity index. Considering traits of different kind, we shall adopt the one proposed by [10]. Thus, S measures how two species are either different ($s_{ij} \to 0$) or alike ($s_{ij} \to 1$).

We use S to create fuzzy sets [11, 12] to which species may be attributed according to their degree of belonging. Unlike ordinary sets, whose attribution of elements is ascertained without doubt, thus either they belong to a set or do not, the degree of belonging establishes how an

element belongs to a fuzzy set: it is a real number ranging [0, 1], where 0 meas "does not belong" and 1 means "does belong", and intermediate values indicate intermediate conditions. For this task (see [3,13]), we normalize the columns of S to their respective total and obtain a matrix U whose columns $\boldsymbol{U}_j = \boldsymbol{S}_j / s._j$, $j = 1, \ldots, p$, are a kind of similarity profile of species j with all other species. Let us now look at U by rows: in every $\boldsymbol{U}_i$, $i = 1, \ldots, p$ for the corresponding i-th species, its normalized similarities with all others (including itself) appear. We may try to attribute a meaning to the rows $\boldsymbol{U}_i$, $i = 1, \ldots, p$ of U: their sums are the sum of the similarities normalized by columns; thus, the most similar are the other species to some, the largest this sum. Thus, we may not consider them probabilities, as they do not sum to 1, but degrees of belonging of all species to the fuzzy set defined by the i-th species itself, that we call the neighbourhood of species i in the traits space. Indeed, the more likely a species may be replaced by species i the larger is its degree of belonging to the i-th neighbourhood. Thus, a neighbourhood represents the capacity of a species to take the place of others, as said under the assumption that the similarity of traits favours this occupation.

Now, let us right multiply the matrix U by W, giving a $p \times n$ matrix $X = U\,W$ [3, 13]. This matrix has a special meaning, since each element $x_{ij} = \sum_k u_{ik} w_{kj}$ represents an estimation of the proportional abundance of the neighborhood of species i in the j-th community. Indeed, x_{ij} is based on relative frequencies w_{kj} and since the columns of U are already standardized to unity sum, each element x_{ij} is also a relative frequency. Once again, the columns of X, $\boldsymbol{X}_j$, $j = 1, \ldots, n$, represent the profile of a potential community, this time built through the fuzzy sets defined by each species based on the traits similarity among species.

Comparison

For exploratory purposes, it may be of interest to get an overall evaluation of predictive capacity of both methods. Indeed, it does not make much sense the comparison with the original data W that are sampling dependent and from which both X and Y derived. Rather, it is relevant to estimate the relation between the latter matrices, since their agreement indicates that both give a good prediction of the potential metacommunity. For this purpose the RV coefficient [14,15] may be considered:

$$RV(X,Y) = \frac{trace(XX'YY')}{\sqrt{trace(XX')trace(YY')}}$$

RV sums all products of corresponding elements in the squared matrices XX' and YY', that represent all relations among units in both X and Y: here, the numerator is a kind of squared (non-centered) covariance among units, whereas the denominator is the square root of the product of the respective (non-centered) variances. Thus, it is a squared correlation index between X and Y and, as such, ranges [0, 1]. In [16] the distribution of RV is given, that gets easy the significance tests.

We remind that the choice of traits to take into account is free, so that different sets of them may be considered. In this sense, considering Y as the criterion matrix to be modeled by trait sets T_1 , ..., T_s , one may select the best set of traits to predict a potential community by choosing that for which $RV(T_i , Y) = \max_i$. An interesting remark may be done on this subject, since, unlike in modeling, the raise in the number of considered traits does not automatically improve the prediction, since there may be traits in the set that are not ecologically relevant for the assembly of the species in the communities and thus they add noise to the prediction.

AN APPLICATION

We apply the method to plant community data from [17] (see also [18]), which were collected in a 3-ha grassland site of the south Brazilian campos vegetation. There were 70 0.2 × 0.2 m

plots located systematically in 14 sets of 5 contiguous plots, in which the estimated cover of plant species was recorded. The species were described by a matrix *B* of 14 morphological traits. The traits refer to plant height (*HE*), leaf tensile strength (*LT*), woody biomass proportion (*WB*), maximum height (*MH*), senescent leaves proportion (SL), upper leaf density proportion (*UL*), leaf width (*LW*), leaf thickness (*TH*), specific leaf area (*SLA*), leaf dry matter content (*LDMC*) all quantitative, and presence of vegetative propagation by rhizomes (*V*1), presence of vegetative propagation by stolons (*V*2), presence of smooth leaf surface (*L*1), presence of prickles on leaf surface (*L*2), as binary traits.

These traits, except *SLA* and *LDMC*, were measured in each plot and here we considered their average value for each species across the plots. The *SLA* and *LDMC* values for each species were taken from a local database. In the first analysis we considered as input such matrix *B* and a community matrix *W* of 70 plots by 61 species. We computed Beals smoothing based on the species relative cover and excluding the present species from the conditional probabilities [8], generating the matrix *Y* of potential communities, which was also standardized to unit community total. By using a simple iterative algorithm [19] we searched, among the 14 traits, for a trait subset maximizing the *RV* coefficient between matrices *X* and *Y*.

Then we tested the significance of the *RV* coefficient against the null model described in [3], which is based on the random permutation among the rows of matrix *B*, keeping matrices *W* and *Y* fixed. Since both *W* and *Y* are not permuted, there is no risk of type *I* error inflation due to spatial autocorrelation, since if there is any, it is incorporated in the null model.

The results indicated that maximum *RV*(*XY*) was obtained by using the following traits: *SL*, *BH*, *TH*, *SLA*, *LDMC*, and *V1*, with *RV*(*XY*) = 0.569 (p = 0.024). When all traits were considered in the computation of *X*, the coefficient dropped to a non-significant *RV*(*XY*) = 0.269 (p = 0.43).

In another analysis we considered a matrix *W* with 14 pooled plots in which the five plots in each set were pooled in one larger plot of 0.2×1.0 m. For the same trait subset as in the analysis with the 70 plots, *RV*(*XY*) = 0.827 (p = 0.006). Using all traits to define *X*, the *RV* coefficient, again, dropped to a non-significant *RV*(*XY*) = 0.594 (p = 0.128).

The results suggest that the selected traits are critical in the assembly of the studied plant communities and that these traits are good proxies of plant adaptations to the prevailing environmental conditions and biotic interactions. With larger plots we should expect a more robust estimation of both *X* and *Y*, but the effects of environmental conditions and biotic interactions may be blurred, since environmental conditions and biotic interactions are in general spatially structured.

CONCLUSION

Some further consideration deserves being done: the choice of different traits in *B* may lead to different results, thus, the problem raises to choose the traits that best build a potential community. We do not close the discussion concerning these alternatives. Systematic deviations of one species, independently of the gradients or correlated to them, may help in establishing some particular features. In any case, chance would play a mayor role.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was carried out during the stay of Sergio Camiz at the Laboratório de Ecologia Quantitativa, Centro de Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (*UFRGS*), with a

Special Visiting Researcher Fellowship under the Brazilian Scientific Mobility Program "Ciências sem Fronteiras" (Grant number: 401345/2014-9).

REFERENCES

[1] E.W. Beals. Bray-Curtis ordination: an effective strategy for analysis of multivariate ecological data. *Advances in Ecological Research*, **14** (1984), 1-55.
[2] V.D. Pillar, L. Orlóci. *Character-Based Community Analysis; the Theory and an Application Program*. SPB Academic Publishing, The Hague (1993).
[3] V.D. Pillar, L.D.S. Duarte, E.E. Sosinski, F. Joner. Discriminating trait-convergence and trait-divergence assembly patterns in ecological community gradients. *Journal of Vegetation Science*, **20**(2) (2009), 334-348.
[4] J. Swan. An Examination of Some Ordination Problems by Use of Simulated Vegetational Data. *Ecology*, **51**(1) (1970), 89-102.
[5] J. Lambert, M.B. Dale. The Use of Statistics in Phytosociology. *Advances in Ecological Research*, **2** (1964), 59-99.
[6] B. McCune. Improving community analysis with the beals smoothing function. *Ecoscience*, **1** (1994), 82-86.
[7] M. Schnittler, M. Unterseher, J. Tesmer. Species richness and ecological characterization of myxomycetes and myxomycete-like organisms in the canopy of a temperate deciduous forest. *Mycologia*, **98**(2) (2006), 223-232.
[8] M. De Cáceres, P. Legendre. Beals smoothing revisited. *Oecologia*, **156**(3) (2008), 657-669.
[9] S. Diaz, S. Lavorel, F. de Bello, F. Quetier, K. Grigulis, M. Robson. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104 (2007), 20684-20689.
[10] J.C. Gower. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. *Biometrics*, **27**(4) (1971), 857-871.
[11] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, **8**(3) (1965), 338-353.
[12] V.D. Pillar, L. Orlóci, E. Feoli. Fuzzy components in community level comparisons. In: E. Feoli, L. Orlóci (Eds.), *Computer Assisted Vegetation Analysis*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers (1991), 87-93.
[13] V.D. Pillar, L.D. Duarte. A framework for metacommunity analysis of phylogenetic structure. *Ecology Letters*, **13** (2010), 587-596.
[14] P. Robert, Y. Escoufier. A Unifying Tool for Linear Multivariate Statistical Methods: The *RV*-Coefficient. *Applied Statistics*, **25**(3) (1976), 257-265.
[15] Y. Escoufier. Le Traitement des Variables Vectorielles. *Biometrics*, **29**(4) (1973), 751-760.
[16] J. Josse, J. Pagès, F. Husson. Testing the significance of the *RV* coefficient. *Computational Statistics and Data Analysis*, **53**(1) (2008), 82-91.
[17] C.C. Blanco, E.E. Sosinski, B.R.C. Santos, M. Abreu da Silva, V.D. Pillar. On the overlap between effect and response plant functional types linked to grazing. C*ommunity Ecology*, **8** (2007), 57-65.
[18] V.D. Pillar, C.C. Blanco, S.C. Müller, E.E. Sosinski, F. Joner, L.D.S. Duarte. Functional redundancy and stability in plant communities. *Journal of Vegetation Science*, **24** (2013), 963-974.
[19] V.D. Pillar, E.E. Sosinski. An improved method for searching plant functional types by numerical analysis. *Journal of Vegetation Science*, **14**(3) (2009), 323-332.

GEOMORPHO: A METHODOLOGY FOR THE COMPLETE GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF A *DEM*

Camiz S.[a,b], *Poscolieri M.*[b]

[a] Sapienza University of Rome, *ITALY*
[b] *CNR*, Institute of Acoustics and Sensors "O.M. Corbino", Rome, *ITALY*

e-mail: sergio.camiz@uniroma1.it

RESUMEN

Se describe una metodología completa para el análisis geomorfométrica completa de un DEM, así como ha sido implementada en un programa. Empezando del DEM mismo, por cada pixel se calculan 8 gradientes, se corre el análisis de componentes principales sobre estos y se clasifican los pixel bajo su coordenadas sobre los primeros 2-3 factores. Luego se calculan estadísticas para cada clase de pixel y se atribuye á cada clase un color resultando de la orientación promedia de la clase como tonalidad y del pendiente promedio como saturación. Como exemplo se presenta el análisis completo del monte Soratte, cerca de Roma.

Palabras Clave: geomorphometry, multidimensional data analysis, *DEM*.

INTRODUCTION

The study of the terrain morphology is based on the identification of the morphometric parameters of each terrain unit within the study area. In particular, altitude, aspect, and slope, are within the most used topographic attributes to take into account. In this respect, the analysis of Digital Elevation Models (*DEM*) significantly helps this investigation, since through their processing it is possible to obtain a quantitative description of the relief.

In previous *E-ICES* congresses communications [1, 2, 3, 4, 5], the authors discussed and applied methods for a thorough analysis of a *DEM*, considering its utility in geomorphometric studies, as far as their application advanced in the methods selection and organization. This led to the definition of a methodology, now implemented in a program, that, starting from the *DEM* itself, carries out with minimum intervention all the computations necessary to achieve the analysis and produces the outputs necessary to represent graphically the obtain results and draw a thematic map in which the terrain units classification is represented by different colours, according to their orientation and slope.

The aim of the methodology is to partition the set of pixels that compose the area under study in homogeneous geomorphometric classes. Considering that they usually form a nearly continuous pattern, the partition may not be *natural*, in the sense that usually discontinuities do not appear in the pattern itself that suggest the existence of isolated natural classes. Thus, we consider that the adopted *Tandem* technique may be a good exploratory method to partition the set of pixels in a nearly optimal way for the purpose.

In the following, our proposed methodology is presented, as it is implemented in the program, and an application example is shown, concerning the Mount Soratte, situated north of Rome in the Italian Latium region.

THE METHODOLOGY

The methodology starts by using a *DEM* as input file, containing the study area, manually delimited to exclude the non-interesting parts, which are filled with zeros. This allows to limit both the user attention and the analysis only to the selected part of the *DEM* that is taken into account by the program. As first step, the program computes eight gradients for each pixel, as its elevation differences with the eight contiguous ones, along *NW, N, NE, E, SE, S, SW,* and *W* directions. A positive difference means that the central pixel is higher than the neighbour and vice versa. Moreover, both slope and aspect values are computed [6].

Then the program runs a classification of the pixels according to the *Tandem Analysis* (*TA*, [7]), that consists of a *Principal Component Analysis* (*PCA*, [8]) followed by a classification of pixels performed on the coordinates issued by *PCA*. *TA* is largely used in exploratory studies, in which a partition is sought to better understand and describe a data structure, in particular when no natural structure in classes exists. The *PCA* used before a classification allows to better control the variables at hand, since the principal components are uncorrelated. This reveals useful to equilibrate the data variability, usually larger along the direction of highly correlated original variables and reduced along the non-correlated ones.

PCA is performed on the eight gradients, since the use of slope and aspect as input variables is not convenient, due to their different ranges and because of aspect is circular. Following is a classification procedure, that starts with a *K*-means [9,10] method applied to the Euclidean distances between pixels, creating quickly 100 classes, then a hierarchical procedure based on minimum variance [11] method, to suggest the suitable number of classes of a partition via two different criteria. The so obtained partition is submitted to another *K*-means, to maximize the between-classes variance. Note that experience of applications of *PCA* to topographic gradients showed that usually the first two principal components summarize, in a relative weighed way, most of the data variability (always over 90%) and their spanned plane corresponds, up to reflections and a rotation, to the rose diagram. In addition, the third one, that summarizes most of the remaining variability, usually opposes peaks to pits. As the used coordinates are standardized to 1, according to the user's choice whether to use 2 or 3 dimensions, the obtained classes would be either distinguished according only to slope and aspect (2 dimensions) or the variability along the third dimension would be dramatically enhanced, so that classes local concerning local elevation maxima and minima would be better put in evidence. To select the best partition, the Calinski and Harabász method [12] is proposed, together with the first- and second-order differences between contiguous hierarchy indexes, less rigorous, but that in practice results more useful for the purpose.

Once defined the partition, for each class means and standard deviations are calculated for both the eight gradients and the three geomorphometric characters elevation, slope, and aspect. For the aspect, measured by an angle, special circular statistics [13,14] were implemented. These statistics are useful to characterize the classes: this is achieved by arranging them in a table in which each class is described according to the given statistics and in a rose diagram, in which both the means and the standard deviations for both slope and aspect are represented. Either parameters are also used to set for each class a colour, according to the Hue-Saturation-Lightness (*HSL*) colour modelling [15], by transforming the respective mean aspect and slope into hue and saturation values, whereas lightness is kept fixed (average) for all classes. All these results are reported by the program both in text and *ENVI* format [16], the latter to be used in Geographical Information System (GIS) environments for a fast building of graphics. Note that these thematic maps give a 3*D*-like impression that may be enhanced by either varying lightness according to a shadow relief or by projecting the image over a Google Earth map containing the study area.

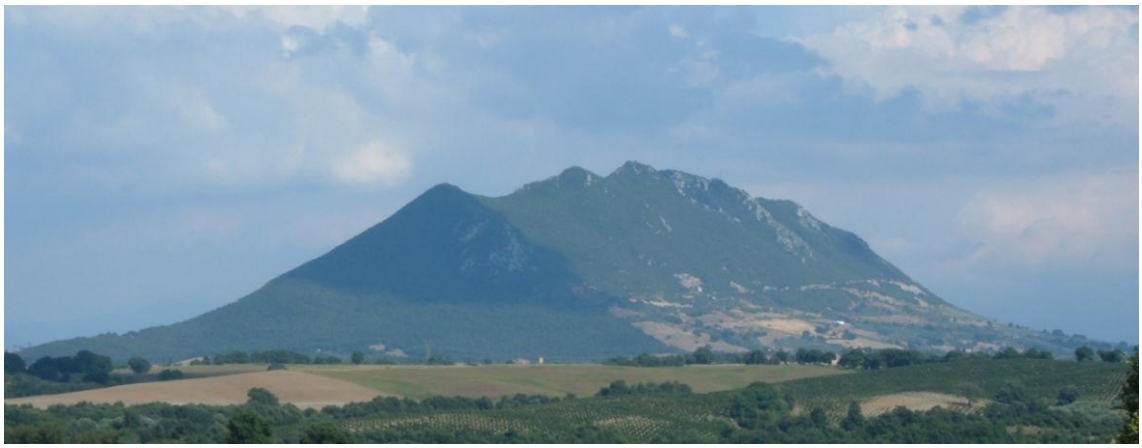


Figure 1. Our example area: Mount Soratte (Latium, Italy).

AN EXAMPLE: MOUNT SORATTE

As case study, an application to Mount Soratte (Figure 1) is presented. Soratte is a NW-SE stretching, isolated, medium relief carbonate massif within the Italian Latium region around 45 km from Roma [17]. In Figure 2, the position of Mount Soratte area is reported on the Latium map. In Figure 3 the *DEM* covering the Mount Soratte is shown.

The used *DEM* has 551×623 pixels, each one measuring 10×10 meters, in which all pixels not belonging to the relief were masked. The main *PCA* eigenvalues were attributed 54.64, 36.23, and 5.88% of total inertia, summarizing 90.87 and 96.75% for either two or three dimensions respectively. In Figure 4, the eight gradients are projected on the first two principal component's circle of correlations: note how they are closer than expected around the first (horizontal axis) directions and less than expected around the second (vertical axis). This is explained by the higher inertia along the *NE-SW* direction, that of the two main Soratte's mountainsides, and the closer ones that are the most correlated with the first principal component. As expected, the third component opposes summits to sinks.

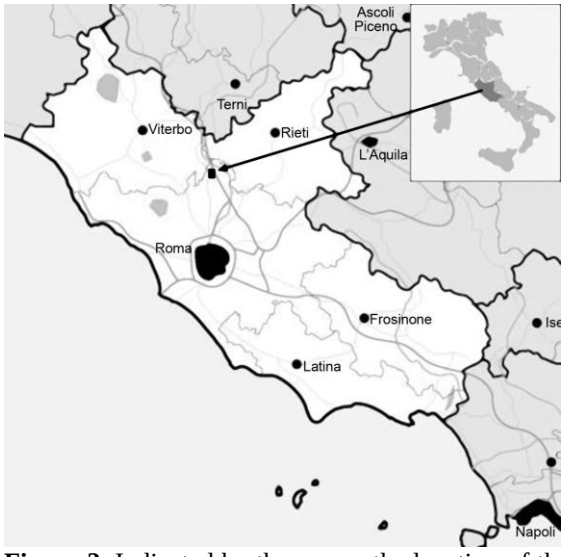


Figure 2. Indicated by the arrow, the location of the DEM containing Mount Soratte within Latium. In the small area, the location of Latium within Italy.

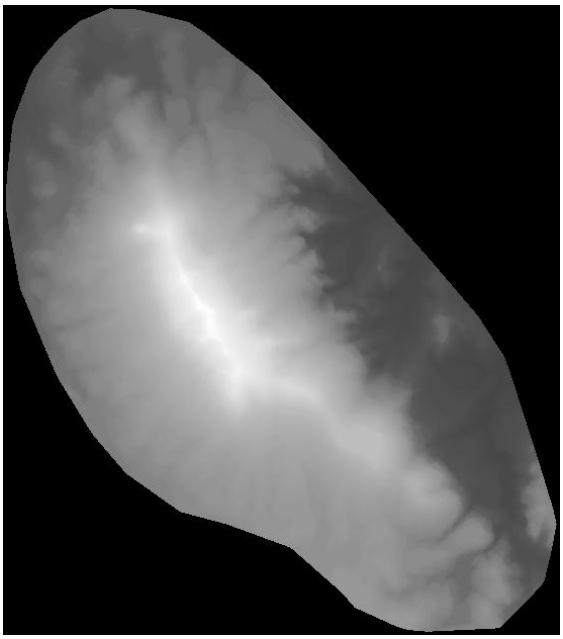


Figure 3. The Mount Soratte DEM used in our example.

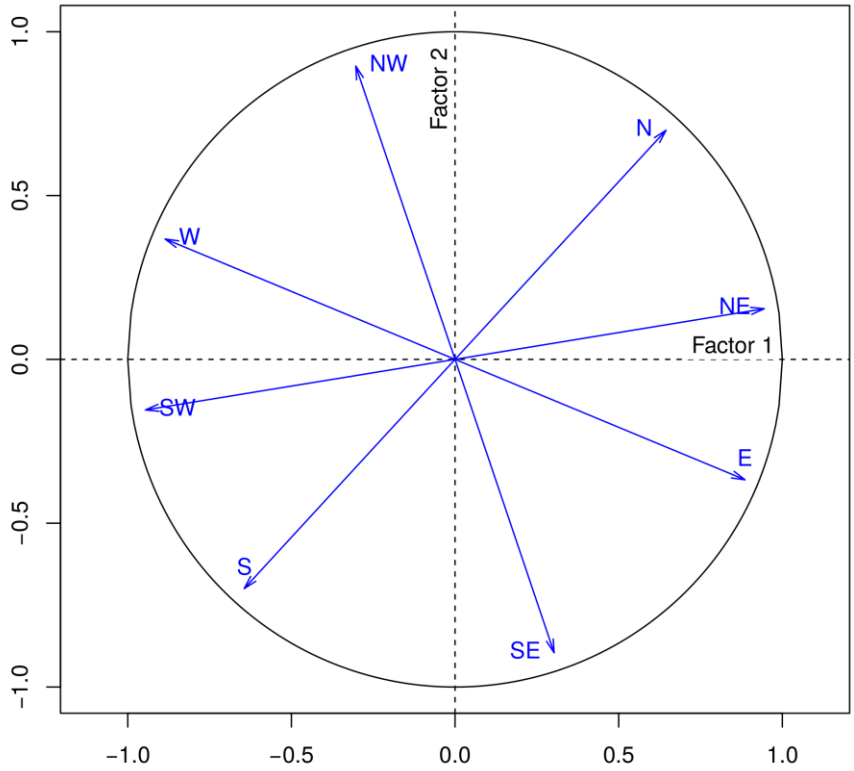


Figure 4. The representation of the eight gradients on the correlation circle spanned by the first two components of PCA.

The classifications in two and three dimensions resulted in 10 and 15 classes, respectively. Slope and aspect of all classes of both partitions are represented also in rose diagrams in Figures 5*left* and 5*right*, respectively. Indeed, little differences appear in the comparison: note the similar positions of classes 1, 3, 5,and 10 of the classification obtained considering the first two principal components with the pairs (2,8), (7,9), (1,3), and (11,12) of the classification based on first three ones, respectively. The components of each pair are distinguished due to the third

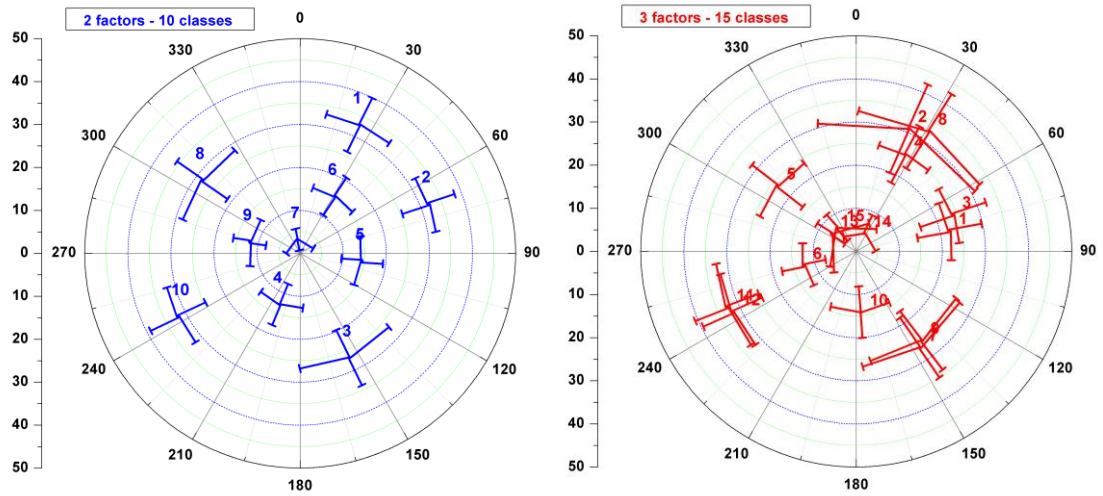


Figure 5. Rose diagrams representing for each class both slope (radially) and aspect (circularly) means and standard deviations, represented in the crosses' centre (mean) and by the branches (standard deviations). Left: classification on two principal components in 10 classes; right: classification on three principal components in 15 classes.

GEOMORPHOMETRIC CLASSES	RELIEF INTERPRETATION	MEAN ELEVATION/ SLOPE/ASPECT	TOPOGRAPHIC GRADIENTS (m)		
1 (3.49%-> 0.71 Km²)	Steep sloping areas facing NE	333.11 m 32.92° 24.79°	3.01 -2.85 -8.42	5.87  -5.86	8.51 2.92 -2.96
2 (4.52%-> 0.92 Km²)	Steep sloping areas facing E-NE	352.01 m 31.90° 68.87°	-3.56 -5.85 -7.92	2.31  -2.27	7.95 5.85 3.59
3 (3.98%-> 0.81 Km²)	Quite steep sloping areas facing SE	289.60 m 26.82° 154.96°	-6.02 -1.88 2.36	-4.25  4.27	-2.18 1.96 6.02
4 (13.16%-> 2.68 Km²)	Gently sloping areas facing SW	266.54 m 12.77° 201.36°	-1.06 0.85 2.75	-1.94  1.93	-2.80 -0.86 1.07
5 (10.25%-> 2.09 Km²)	Gently sloping areas facing E	220.00 m 14.51° 97.21°	-2.62 -2.42 -2.19	-0.23  0.24	2.19 2.41 2.62
6 (11.90%-> 2.43 Km²)	Averagely sloping areas facing NE	235.82 m 15.51° 31.29°	0.74 -1.44 -3.68	2.19  -2.20	3.68 1.45 -0.72
7 (31.27%-> 6.38 Km²)	Quite flat areas slightly facing NW	189.13 m 3.25° 349.51°	0.12 0.04 -0.07	0.09 -0.10	0.05 -0.05 -0.15
8 (2.88%-> 0.59 Km²)	Steep sloping areas facing NW	290.89 m 28.37° 306.89°	7.05 4.28 1.33	3.04  -3.03	-1.17 -4.26 -7.14
9 (14.52%-> 2.96 Km²)	Gently sloping areas facing W	214.96 m 12.01° 283.00°	2.22 1.88 1.52	0.36  -0.36	-1.51 -1.89 -2.24
10 (4.02%-> 0.82 Km²)	Steep sloping areas facing SW	426.03 m 31.91° 242.53°	2.65 5.52 8.26	-2.94  2.95	-8.36 -5.54 -2.57

Figure 6. Classes obtained by processing the topographic gradients of Mont Soratte on the basis of the classification on two principal components in 10 classes. Each class, of which the covered surface is pointed out, is provided with a morphologic interpretation and the mean values of both main landform attributes and topographic gradients with respect to the central pixel of a 3x3 kernel (shown as Red for negative and as Blue for positive).

dimension and, in particular, each pair, even exhibiting analogous mean slope and aspect values, differ on the basis of the average gradients values, sometimes steeper in the uphill side with respect to the downhill one and vice versa, which reflect respectively concave or convex morphological settings. This is clearly shown in the corresponding tables reported in Figures 6 and 7, in which the classes statistics are fully described and interpreted. Other classes correspondences between the two partitions are 4 with 10, 8 with 5, and 9 with 6. Concerning the nearly-flat areas, the unique class (7) in the partition in 10 classes, in the partition in 15 appears replaced by three, of which 13 represents pits, 14 quite flat pixels, and 15 peaks.

In Figures 8, the thematic maps are shown. Here the pixels were coloured according to the class of belonging as said: the hue represents the average aspect of the class and the saturation represents the average slope. In Figures 9, the two maps issued by 15 classes partition are shown, the second obtained by rotating the hue by 180º: this way, each colour is transformed to its supplemental, somehow modifying the visual appreciation: the choice among the two possible colouring (as well as those that may be obtained by a different rotation) is left to the end-user.

Some further manipulation may be done on the obtained geo-referenced thematic maps, taking advantage of a *GIS* program, such as *ENVI* [16]. Considering that our maps have constant lightness, we could merge it with a shaded relief of the same area, which modifies only this parameter.

GEOMORPHOMETRIC CLASSES	RELIEF INTERPRETATION	MEAN ELEVATION/ SLOPE/ASPECT	TOPOGRAPHIC GRADIENTS (m)		
1 (5.84%-> 1.19 Km²)	Averagely sloping areas facing E	290.25 m 22.16° 77.55°	-2.36 -3.43 -4.16	1.34 → -0.61	5.53 4.34 3.43
2 (1.09%-> 0.22 Km²)	Steep sloping areas facing NE	268.93 m 30.94° 23.23°	-0.06 -4.16 -9.99	2.64 ↗ -7.09	3.68 0.64 -4.76
3 (4.78%-> 0.97 Km²)	Quite steep sloping areas facing E	298.29 m 24.00° 69.22°	-3.10 -4.75 -6.71	1.18 → -2.11	4.76 3.48 1.81
4 (5.43%-> 1.11 Km²)	Quite steep sloping areas facing NE	303.31 m 25.17° 26.89°	1.95 -2.16 -6.23	4.16 ↗ -4.10	6.34 2.24 -1.85
5 (3.73%-> 0.76 Km²)	Averagely sloping areas facing NW	264.57 m 23.75° 309.71°	5.92 3.37 0.76	2.70 ↖ -2.64	-0.62 -3.32 -5.87
6 (12.70%-> 2.59 Km²)	Gently sloping areas facing W-SW	247.73 m 12.59° 254.86°	1.43 2.03 2.63	-0.58 ← 0.64	-2.59 -1.98 -1.34
7 (1.81%-> 0.37 Km²)	Quite steep sloping areas facing SE	283.00 m 26.77° 146.57°	-4.35 -1.46 2.64	-2.74 ↘ 4.82	0.04 3.37 7.76
8 (1.18%-> 0.24 Km²)	Steep sloping areas facing NE	321.25 m 32.57° 31.25°	3.65 -1.65 -4.81	7.11 ↗ -3.09	11.27 4.98 0.25
9 (2.08%-> 0.42 Km²)	Quiet steep sloping areas facing SE	250.86 m 25.60° 143.83°	-7.43 -3.30 -0.03	-4.49 ↘ 2.62	-2.04 1.68 4.28
10 (10.59%-> 2.16 Km²)	Gently sloping areas facing S	264.52 m 14.13° 175.94°	-2.24 -0.02 2.18	-2.25 ↓ 2.24	-2.20 0.03 2.26
11(1.75%-> 0.36 Km²)	Steep sloping areas facing SW	409.46 m 32.65° 246.62°	4.37 7.01 10.00	-1.82 ← 3.37	-6.37 -4.59 -2.08
12 (2.15%-> 0.44 Km²)	Steep sloping areas facing SW	409.28 m 31.91° 243.83°	1.92 4.55 6.64	-3.39 ← 2.14	-9.66 -6.51 -3.65
13 (12.59%-> 2.57 Km²)	Quite flat areas (pits) slightly facing NE	190.72 m 7.13° 305.73°	0.04 -0.11 -0.52	-0.23 - -0.83	-0.72 -0.91 -1.35
14 (22.12%- > 4.51 Km²)	Quite flat areas	192.22 m 4.52° 24.08°	-0.06 -0.42 -0.80	0.36 → -0.38	0.76 0.40 0.04
15 (12.17%-> 2.48 Km²)	Quite flat areas (peaks)	197.78 m 7.00° 321.01°	1.25 0.76 0.50	0.89 + 0.17	0.73 0.27 0.02

Figure 7. Classes obtained by processing the topographic gradients of Mont Soratte on the basis of the classification on three principal components in 15 classes. Each class, of which the covered surface is pointed out, is provided with a morphologic interpretation and the mean values of both main landform attributes and topographic gradients with respect to the central pixel of a 3x3 kernel (shown as Red for negative and as Blue for positive).

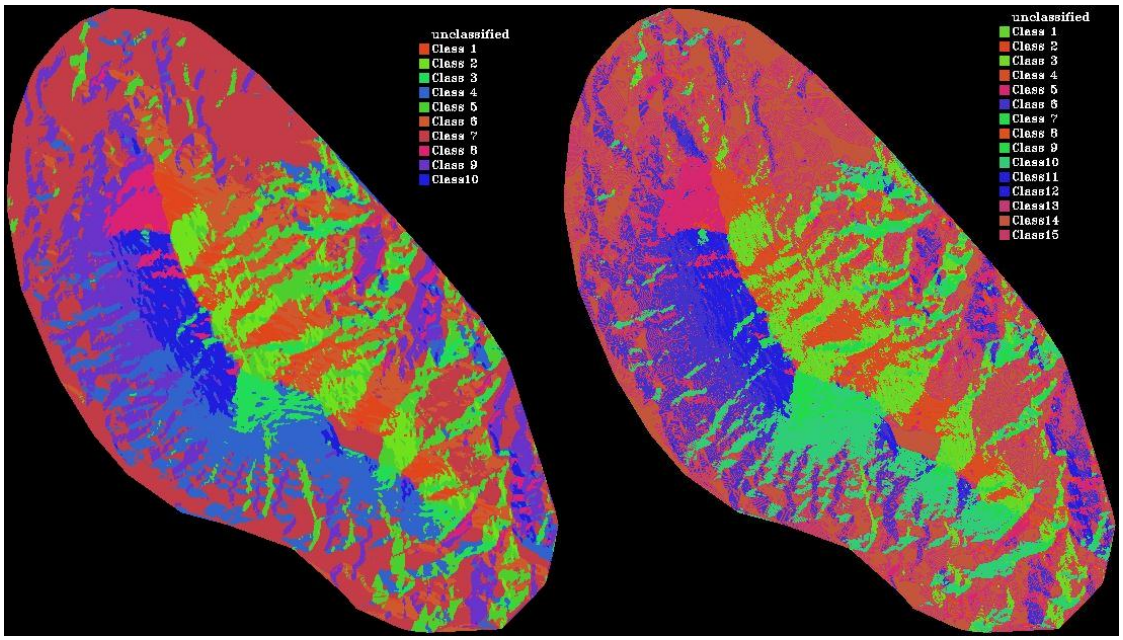


Figure 8. The raster reconstruction of the DEM through the colours attributed to pixels according to both average aspect (hue) and slope (saturation) of the classes of belonging. The lightness is fixed to an average value. Left: Partition in 10 classes; right: Partition in 15 classes.

It is striking the relief effect resulting by this integration of the shaded relief with the classes colouring based on corresponding aspect and slope mean values. Note also in Figure 11 the result of the overlapping of the same thematic map on the satellite vision of Google Earth. In this case, the point of view may be chosen at pleasure, thus enhancing the ability of the thematic maps to inform about the terrain structure.

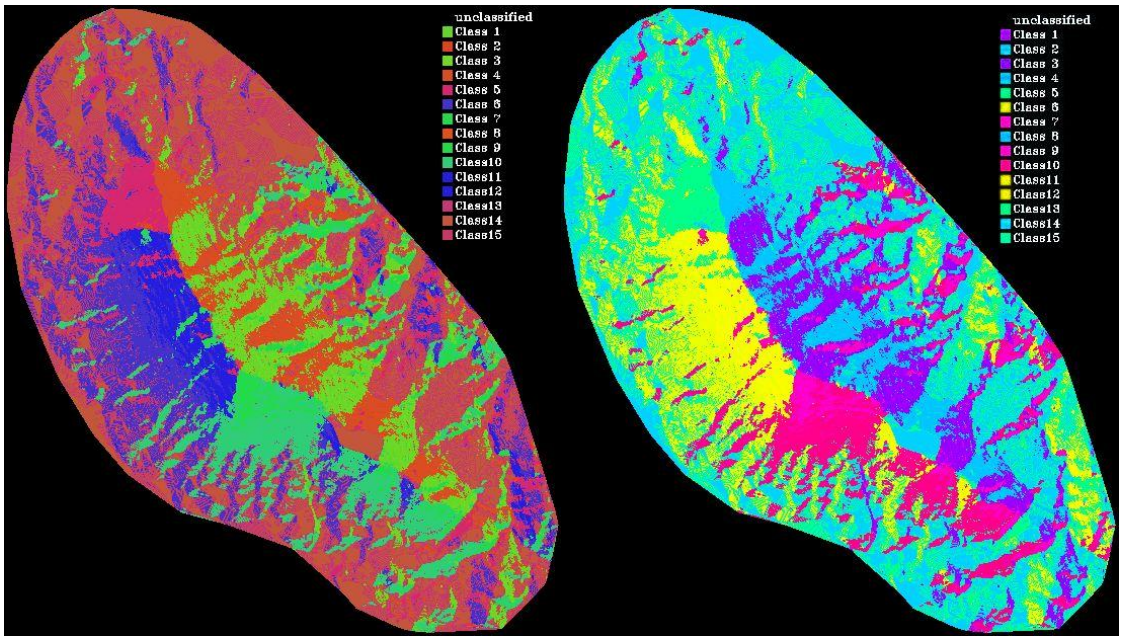


Figure 9. Comparison among the two raster reconstructions of the DEM according to the partition in 15 classes, the right one obtained by a rotation of 180º of the hue of the left one. This way, the colours are transformed to their complement.

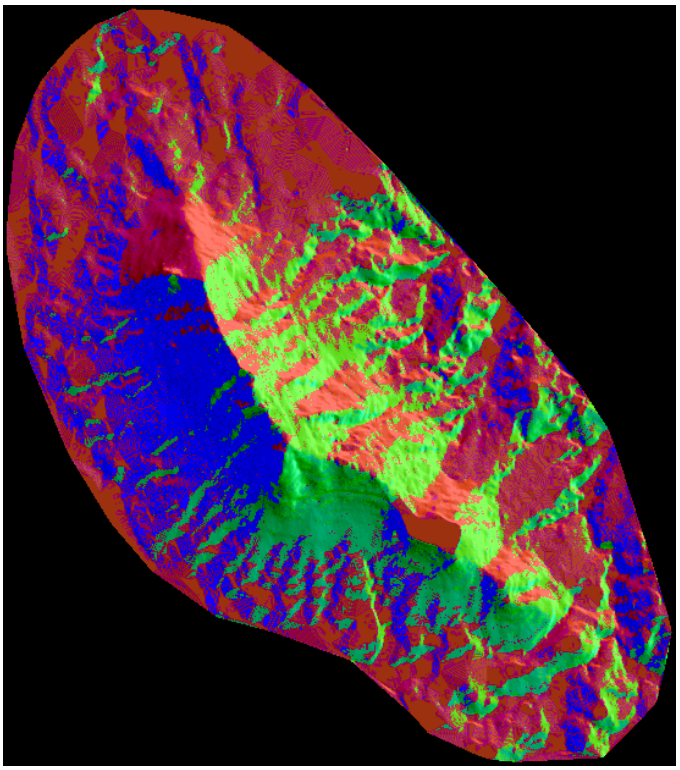


Figure 10. The raster reconstructions of the DEM according to the partition in 15 classes, superposed to the shaded relief obtained by ENVI program: as the lightness was not affected by the thematic colouring, its variation due to the shading adds a striking power to the image.

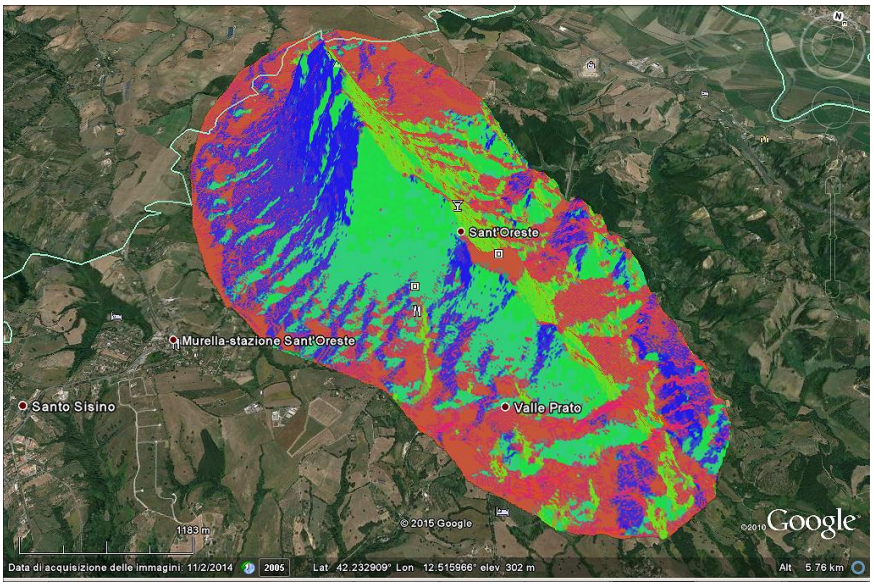


Figure 11. The raster reconstructions of the DEM according to the partition in 15 classes, superposed to the Google Earth vision.

CONCLUSION

The methodology proved effective in determining easily an exploratory view of the morphology of a terrain. Some improvements are foreseen, in particular to ease the construction of graphical tools. A derived methodology is currently developing, to compare the morphology of a set of Centre- and South-American volcanoes. Integration with other methods and/or programs could be interesting [18].

REFERENCES

[1] M. Poscolieri, Geomorphometry as a value added to land analys. *Proceedings of the E-ICES Conference 5*, Malargüe (Argentina), 24-27 November 2009. Buenos Aires (Argentina), CNEA, 236-244, 2010.

[2] S. Camiz, J.J. Denimal, M. Poscolieri, Comparison of Classification Methods on Geomorphometric Data of Peteroa Volcano Area, *Proceedings of the E-ICES 6*, Buenos Aires (Argentina), CNEA, CD-ROM, ISBN 978-987-1323-21-0, 19–29, 2011.

[3] S. Camiz, M. Poscolieri, Geomorphometric Maps of Volcanic Areas through Multidimensional Analyses, *Proceedings of E-ICES 7*, Buenos Aires (Argentina), CNEA, 57–66, 2012.

[4] S. Camiz, M. Poscolieri, M. Roverato, Comparison of three Andean volcanic complexes through Multidimensional Analyses of geomorphometric data, In: G. Bianchini *et al.*, *Proceedings of E-ICES 8*, Buenos Aires (Argentina), CNEA, 52–74, 2013.

[5] Camiz S., Poscolieri M., Roverato M., Morpho-Structural Comparison of Latin-American Volcanoes, *Proceedings of E-ICES 9*. Buenos Aires (Argentina) , CNEA, 46-64, 2014.

[6]Guth P., Slope and aspect calculations on DEMs, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Neue Folge, Supplementband 101, 31-52, 1995.

[7] P. Arabie, L. Hubert, *Cluster analysis in marketing research*, in R. J. Bagozzi (Ed.), *Advanced methods of marketing research*, Blackwell, London, 160–189,1994.

[8] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Springer, New York, Springer Series in Statistics, 2nd ed., 2002.

[9] J.B. MacQueen, Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1, 281-297, 1967.

[10] A.D. Gordon, *Classification*, Chapman and Hall, London,1999.

[11] J.H. Jr Ward, Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *JASA*, 58(301), 236-244, 1963.

[12] R.B. Calinski and J. Harabász, A Dendrite Method for Cluster Analysis, *Communications in Statistics*, 3, 1-27,1974.

[13] K.V. Mardia, P.E. Jupp, *Directional Statistics*, Wiley, New York,1999.

[14] N.I. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data*, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1993.

[15] M.K. Agoston, *Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms*, Springer, London, 2005.

[16] ENVI, *ENVI User's Guide - version 4.7*, ITT Visual Information Solution, 2009.

[17] G. Abbate, R.M. Cavalli, S. Pascucci, S. Pignatti, M. Poscolieri, Relations between morphological settings and vegetation covers in a medium relief landscape of Central Italy, *Ann. Geophys.*, 49(1), 153–165, 2006.

[18] P. Grosse, B. van Wyk de Vries, P.A. Euillades, M. Kervyn, I.A. Petrinovic, Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models, *Geomorphology*, 136, 114-131, 2012.

PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO Y GESTIÓN DE RESIDUOS EMPETROLADOS GENERADOS EN LA ACTIVIDAD PETROLERA

Cantero, José A.[a]; Gálvez, José A.[a]; López, Andrea C.[a]; Pineda, Ivana[a]
Vardaro, Sergio, A.[a]

[a] Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

e-mail: jcantero@uncu.edu.ar

RESUMEN

El manejo inadecuado de los materiales y residuos empetrolados originados en la actividad petrolera ha provocado un impacto ambiental negativo en áreas petroleras de la República Argentina. Debido a la variabilidad de los componentes y productos derivados del petróleo (a los tiempos transcurridos desde que se generaron los impactos, tipos de suelos afectados, clima de la región, regulaciones vigentes y a las alternativas técnicas de tratamiento y saneamiento aplicadas y disponibles para cada región), es fundamental disponer de procedimientos que permitan obtener una caracterización exhaustiva de la contaminación involucrada con el objeto de seleccionar una o más alternativas de tratamiento y recuperación que sean ambiental y económicamente factibles.
Los protocolos realizados para la caracterización y tratamiento incluyen: A) Análisis de los resultados obtenidos de la caracterización y evaluación de sitios contaminados, los que incluyen el estudio del estado fisicoquímico, localización y distribución de los contaminantes encontrados, modelización de su movilidad y disponibilidad en las matrices en que se encuentren (suelo, aguas, recortes y otros residuos operativos) considerando las particularidades geográficas, hidrogeológicas y climáticas regionales, mediante el empleo de Normas y Procedimientos de uso internacional. B) Evaluación del Riesgo a la Salud Humana y al ecosistema en las condiciones y en las matrices en que se encuentren los contaminantes y sus mezclas, para obtener metas o niveles de limpieza basados en la evaluación cuantitativa del riesgo a la salud humana y al ambiente. C) Ensayos de alternativas de tratamientos destinados a minimizar, transformar y eliminar los contaminantes que representen un riesgo para la salud humana y el ambiente. D) Comparar los resultados obtenidos con estándares y regulaciones legales vigentes. E) Elaborar propuestas de actuación seleccionando una o más tecnologías que resulten técnica y económicamente factibles a la situación estudiada. F) Estandarizar y protocolizar los procedimientos estudiados y desarrollados para cada región.

Palabras Clave: residuos empetrolados, caracterización, riesgos, tratabilidad

INTRODUCCIÓN

El problema de los suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos radica en que hasta hace muy pocos años no existían conocimientos sobre el grado de dificultad y los costos que representan su remediación y recuperación, por lo que actualmente nos enfrentamos al desafío de investigar las características de los sitios afectados, estudiar la propiedades fisicoquímicas de los materiales y/o contaminantes presentes (caracterización), las características y propiedades de los suelos o las matrices afectadas, la movilidad y disponibilidad de los contaminantes presentes, el riesgo sobre la salud humana y el ambiente con el objetivo de formular procedimientos de saneamiento, así como de alternativas técnicas para el tratamiento y recuperación de los materiales, residuos y recursos afectados. Los objetivos particulares de este trabajo consisten en: A) Analizar los resultados obtenidos de la caracterización y evaluación de sitios contaminados por la actividad petrolera. Estudiar el estado fisicoquímico, localización y distribución de los contaminantes encontrados, modelar su movilidad y disponibilidad en las matrices en que se encuentren (suelo, aguas, recortes y otros residuos operativos) considerando particularidades geográficas, hidrogeológicas y climáticas regionales. B) Evaluar el Riesgo a la Salud Humana y al ecosistema en las condiciones y en las matrices en que se encuentren los contaminantes y sus mezclas, para obtener metas o niveles de limpieza de acuerdo a la evaluación cuantitativa de riesgo a la salud humana y al ambiente. C) Ensayar alternativas de tratamientos destinados a minimizar, transformar y eliminar los contaminantes que representen un riesgo para la salud humana y el ambiente. D) Comparar resultados obtenidos con estándares y regulaciones legales vigentes. E) Elaborar propuestas de actuación seleccionando una o más tecnologías que resulten técnica y económicamente factibles a la situación estudiada. F) Estandarizar y protocolizar los procedimientos estudiados y desarrollados para cada región.
Los trabajos destinados a investigar y evaluar la presencia de contaminantes, son encarados según dos niveles de desarrollo: una investigación exploratoria preliminar y una evaluación detallada de cada sitio, los que permiten determinar el grado de afectación de los medios analizados y seleccionar las acciones correctivas más convenientes a aplicar en cada sitio, minimizando los impactos ambientales que el conjunto de acciones puedan generar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Diagnóstico Ambiental

El diagnóstico ambiental consiste en una primera fase de estudios preliminares conformada por la recopilación de información de antecedentes históricos sobre actividades u operaciones acontecidas en el sitio, estudios topográficos, ambientales, geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos efectuados sobre el sitio y/o sobre la zona de influencia, así como tareas de saneamiento u otras acciones correctivas implementadas con anterioridad, seguido del relevamiento de aspectos e impactos ambientales, estudios técnicos sobre las actividades desarrolladas en el sitio y la planificación de muestreos destinados a confirmar y evaluar el nivel de afectación de los recursos. Efectuar el relevamiento topográfico del sitio afectado y del entorno potencialmente afectado, para obtener datos sobre construcciones e instalaciones superficiales o soterradas. Detectar presencia de hidrocarburos u otros contaminantes de interés en suelos y subsuelos. Individualizar las fuentes de contaminación. Detectar las posibles vías de migración de los contaminantes. Trazar curvas tentativas de dispersión de contaminantes en suelos [1].
Efectuar un mapeo de los sitios afectados que permita localizar: las fuentes de contaminación (represas, fosas, derrames, etc.), los medios potencialmente afectados, los aspectos e impactos ambientales ocasionados y los pozos freatímetros o de bombeo de agua que posibiliten monitorear los acuíferos subyacentes a los sitios a sanear [1] [2].
Los principales objetivos que se persiguen con la realización de los estudios preliminares son:

Clasificar los sitios de acuerdo a las condiciones ambientales existentes, teniendo en cuenta los contaminantes detectados, medios afectados, sensibilidad ambiental y social. Obtener un orden de prioridades para la ejecución de las evaluaciones y las acciones correctivas a implementar. Planificar un muestreo estratégico de suelos, necesario para evaluar y cuantificar la contaminación existente en el sitio. Localizar pozos freatímetros o de bombeo de agua para el monitoreo de los emplazamientos donde las acciones correctivas a implementar requieran de un control periódico. Todo el proceso de investigación se desarrolla en el marco de normativa internacional. Los Estudios Detallados contemplan la Evaluación Ambiental (Riesgos, vulnerabilidad y sensibilidad ambiental) de cada una de los emplazamientos donde se detectó la presencia de anomalías.

Evaluación Ambiental - Análisis Cuantitativos de Riesgo (ACR).

El Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) tiene como objetivos valorar los riesgos potenciales para la salud humana y el ambiente, asociados a la afectación o contaminación detectada en el suelo de la instalación [3]; Establecer concentraciones residuales admisibles o Niveles Máximos de Referencia (RBLs) en suelo según los receptores y vías de exposición considerados, para las cuales el riesgo para la salud humana es aceptable; Obtener criterios contrastados que sean de ayuda en la adopción de medidas, ya sean correctoras, de gestión y/o prevención del riesgo, y en el establecimiento de prioridades en la adopción de las medidas a implementar [3] [4].

Nivel Base de Referencia (RBLs) para suelos

"Los niveles base de referencia indican la concentración a partir de la cual el contaminante provoca efectos tóxicos sobre la salud humana y se obtienen para el contaminante en particular, según la situación de riesgo que involucre su presencia en el suelo, subsuelo, agua subterránea y atmósfera" [4].

Propuestas de Actuación

La limpieza de un sitio que contenga substancias tóxicas se focaliza en la presencia de los tóxicos que representan un peligro para la salud de la población y para el ambiente. Esto quiere decir que antes de proceder a eliminar las substancias tóxicas del ambiente, se deben evaluar los riesgos que representan, si no se las controlara en forma adecuada.
Los objetivos de la remediación deben determinarse teniendo siempre en cuenta los riesgos que pueden provocar los contaminantes. No debe olvidarse que la mejora medioambiental perseguida debe garantizar, como mínimo, la salud de las personas y la supervivencia de los ecosistemas.

Tecnologías de Remediación

Una forma de clasificar las técnicas de tratamiento de suelos contaminados puede realizarse en función del lugar donde se ejecutará la misma. Las técnicas de tratamiento in situ son las que se aplican sin necesidad de trasladar el suelo o el agua subterránea afectados por el problema. Suelen ser de utilidad cuando el problema afecta a un volumen muy importante del suelo, que haga inviable su aislamiento y su tratamiento ex situ, o cuando éste supone un costo económico que lo hace inviable, ya que el tratamiento in situ suele implicar un menor costo económico. Las técnicas ex situ tienen en común que el suelo es removido de su lugar original, y tratado en un sector o a una planta externa, para la eliminación del contaminante mediante una variedad de técnicas disponibles. Tras el tratamiento, el suelo puede ser devuelto a su lugar original, siempre y cuando se verifique que está completamente descontaminado.
Dentro de las principales tecnologías de remediación aplicables a suelos empetrolados podemos mencionar a biorremediación in situ, excavación y biorremediación ex situ, excavación y lavado

de suelos, excavación e incineración de suelos, excavación y desorción térmica de suelos, entre otras [5].

Impactos Ambientales generados en la ejecución de las actuaciones

Todo proyecto, antes de materializarse, es susceptible de ser sometido a un análisis que permita evaluar el impacto de los cambios referidos. Considerase Impactos Ambientales al conjunto de cambios producidos por las obras humanas en el ambiente natural, socio-económico, cultural y/o estético [6]. La Evaluación de Impacto Ambiental surge como una herramienta indispensable de la planificación física de las acciones, en orden al comportamiento de la naturaleza (ecosistema) en el entorno donde se busca emplazar las futuras actividades humanas. La Evaluación del Impacto Ambiental es el proceso de análisis de distintas alternativas, con el fin de diferenciar sus ventajas y desventajas, para priorizar aquellas que optimicen los beneficios y disminuyan los impactos no deseados.

RESULTADOS

Muestreo y caracterización de suelos contaminados:

Para el diseño del relevamiento de sitio y muestreo de suelos se tomaron en consideración las recomendaciones establecidas en el "Manual práctico de investigación de la contaminación del suelo" del IHOBE [7] y la norma ASTM "Standards Relating to Environmental Site Characterization 2nd editions" revision 2010. A tal efecto para elaborar el diseño de muestreo y caracterización de suelos contaminados se implementarán las siguientes acciones:

Ejecutar el muestreo estadístico de suelos y subsuelos, describir detalladamente los perfiles observados, los materiales y rellenos depositados, obtener el mapeo correspondiente.
Determinar las características físico-químicas del suelo y subsuelos comprometidos, de los rellenos y de los materiales depositados.
Obtener la caracterización y concentración de los hidrocarburos y de otros contaminantes encontrados en los diferentes horizontes del suelo y subsuelo.
Localizar puntos de máxima concentración de contaminantes y determinar su distribución.
Cuantificar los volúmenes de suelos y subsuelos contaminados en el área o instalación relevada.

Diagnóstico Ambiental y Evaluación de Riesgos

El proceso de diagnóstico ambiental consiste en efectuar la evaluación de los riesgos que implique la permanencia de los contaminantes en el sitio y / o los riesgos que puedan producirse por la ejecución de acciones correctivas. Comparar con Leyes, Regulaciones y Normas de referencia con el fin de verificar, si las concentraciones de los contaminantes detectados superan los límites legales permitidos y a su vez representan factores de riesgo que conduzcan a situaciones especiales a resolver, esto implica desarrollar niveles de riesgo específicos de cada sitio y clasificarlos para poder planificar la acción correctiva a implementar y monitorear su evolución y así formular conclusiones y recomendaciones en las que se fundamenten las necesidades de remediación y se defina su alcance.

Los modelos de migración de contaminantes utilizados para la evaluación de riesgo utilizan componentes claves para definir las concentraciones de los contaminantes que, en las condiciones del suelo y de exposición definidas, determinan la dosis máxima que puede recibir una persona. Esta concentración dependerá no solamente del tipo de hidrocarburo y del suelo sino también del tiempo de exposición. Los componentes claves son Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos, además la composición de hidrocarburos Aliáticos y Aromáticos discriminados por fracciones y los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HAP´s) presentes en

el suelo. Esta metodología corresponde a la norma ASTM D 1739 y es la más aplicada en el ambiente petrolero. Se considera también la presencia de metales pesados sobre muestra total y lixiviables.
Se estudia la aplicación de un modelo que permita determinar la sensibilidad del suelo a variables relacionadas con la transferencia de materia desde la fase suelo a la fase aire, agua o desde al agua del suelo al aire del mismo, y enfocar el estudio de riesgo a esa fase. El esquema de modelo conceptual de migración de contaminantes en el suelo afectado define las etapas principales en cada transferencia:

Suelo más hidrocarburo a agua de suelo: Difusión a través del poro de suelo (difusión retardada por sorción), disolución en la fase acuosa.
Fase libre: Aporta compuestos al suelo (difusión), al aire del suelo (volatilización), a los lixiviados y también se degrada.
Suelo más hidrocarburo a aire del suelo: Difusión a través del poro de suelo y evaporación
Agua de suelo: Recibe los hidrocarburos del suelo, en ella acontecen procesos de degradación y evaporación, el resto lixivia junto con el agua.
Gas del suelo: Recibe los hidrocarburos del suelo, del agua y de la fase libre; los moviliza a la atmósfera. Puede recibir los productos de la biodegradación (Dióxido de Carbono si es aeróbica o metano si es anaeróbica).

Análisis Cuantitativo del Riesgo (ACR)

El proceso de análisis consta de tres fases que se relacionan entre sí. Se inicia con el análisis de la toxicidad del contaminante, 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.
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).
El alcance del proceso de evaluación de riesgos se encuentra enmarcado en lo establecido en los estándares ASTM E 1739-95 (2002) y E 2081-00 (2004).
Debido a la amplia aceptación internacional como herramienta para la evaluación de riesgos toxicológicos derivados de impactos de los contaminantes presentes el en suelo, el análisis de ACR ó RBCA es una herramienta de apoyo en el proceso de evaluación y toma de decisiones en casos de contaminación por productos derivados del petróleo. Es un sistema que fue desarrollado por la American Society for Testing and Materials (ASTM), publicado en 1995 y actualizado y revisado permanentemente.
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.
Actualmente utilizamos como herramienta operativa el software "RBCA Tool Kit for Chemical Releases", desarrollado por la firma GSI Environmental Inc. (USA), versión 2.6e. Éste incluye las fórmulas de los modelos matemáticos propuestos por ASTM para el cálculo de los riesgos y las concentraciones objetivo. El uso de este software es aceptado ampliamente en el mundo por organismos de regulación en material ambiental, principalmente en Estados Unidos, Canadá y Reino Unido, entre otros. No obstante ello, se pueden aplicar los modelos de cálculo desarrollados según la Norma ASTM E 1739 -10. Estos modelos para el cálculo del RBSLs también son los recomendados para la Evaluación de Riesgos por la Norma ASTM E 1739-10 en "Standard Guide For Risk-Based Corrective Action Applied at petroleum release Sites "

A continuación se presenta un resumen de los pasos más importantes de la metodología allí desarrollada:

Tabla I. Resumen de etapas de un análisis de riesgo según el estándar ASTM E 1739-95

Etapa	Nombre	Actividades involucradas
1	Evaluación del sitio	Identificación de: fuente de contaminación impactos ambientales evidentes receptores potenciales o reales potenciales vías de migración del impacto
2	Clasificación del sitio	Se clasifica al sitio según los riesgos implícitos de acuerdo a lo observado en 1, y se determinan en consecuencia las acciones inmediatas de respuesta al evento
3	Evaluación de nivel 1	Determinación de concentraciones de referencia de acuerdo a las características del sitio (RBSLs) y comparación con las concentraciones existentes en el sitio, con el fin de determinar la necesidad de medidas correctivas.
4	Evaluación de nivel 2	Determinación de las concentraciones para las sustancias de interés a partir de las cuales el riesgo para la salud humana y para el ambiente es aceptable.

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.

La selección del modelo a aplicar para el cálculo del RBSLs se efectúa se acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM E 1689-95 (Reapproved 2008) Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites, y se procede al ajuste del Modelo Conceptual del Sitio según los aspectos siguientes: Esquema hidrogeológico; Escenario de exposición; Sustancias de Interés; Fuentes de contaminación; Mecanismos de transporte; Receptores potenciales y Vías de exposición.

Tecnologías de Remediación

Dentro de las principales tecnologías de remediación aplicables a suelos empetrolados podemos mencionar a biorremediación in situ; excavación y biorremediación ex situ; excavación y lavado de suelos; excavación e incineración de suelos; excavación y desorción térmica de suelos. A continuación se describen brevemente las distintas tecnologías y se analiza su aplicabilidad:
Biorremediación: El término biodegradación hace referencia a la transformación de contaminantes a través del uso de microorganismos, cualquiera sea el medio en que se encuentren. Si el suelo afectado se encuentra acumulado por encima de la superficie, el

principio de funcionamiento es el de Biopilas y si el suelo a tratar está soterrado (in-situ) el principio de funcionamiento es el de Biocelda aireadas y por remoción mecánica, en ambos casos el proceso consiste en incentivar la actividad microbiana, para lo cual se oxigena mecánicamente el suelo mediante remoción con máquinas excavadoras y se mantienen dentro de límites adecuados los valores de humedad, nutrientes, pH y temperatura. Este sistema se diseña para trabajar con alturas o profundidades variables de hasta tres metros y volúmenes superiores a 500 m^3, lo que permite mantener la temperatura del proceso por encima de 25ºC aun cuando la temperatura ambiente sea inferior a 0ºC. Esta tecnología se aplica satisfactoriamente para el tratamiento de compuestos orgánicos tales como hidrocarburos, combustibles refinados, compuestos orgánicos volátiles no halogenados (COVs). Los compuestos orgánicos volátiles halogenados, los orgánicos semivolátiles y pesticidas también se pueden tratar aunque la efectividad del proceso puede ser menor.

Lavado de suelos: Los procesos físicos del lavado aplicados al tratamiento de los suelos contaminados, se utilizan fundamentalmente para llevar a cabo la separación del contaminante en sus componentes con el objeto de reducir los volúmenes de suelos afectados y segregar las sustancias responsables de su peligrosidad, a los efectos de disminuir su concentración mediante procesos específicos. El lavado de suelos contaminados se fundamenta en la solubilidad que poseen ciertos contaminantes en determinados solventes. (ej. agua). La generalización del principio de que "lo semejante disuelve lo semejante" se basa en la observación de que las interacciones tienden a ser mayores entre moléculas similares que entre pares estructurales distintos. El lavado de suelos es una técnica de restauración ex-situ. Los grupos de contaminantes objetivo para el lavado del suelo son SVOCs, combustibles, substancias inorgánicas como cianuros y metales pesados. La tecnología se puede utilizar en compuestos orgánicos volátiles seleccionados y pesticidas. Esta tecnología ofrece la posibilidad de recuperación de metales y se puede limpiar una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos a partir de suelos de grano grueso.

Incineración de suelos: Se utiliza para volatilizar y quemar (en presencia de oxígeno) compuestos halogenados y otros compuestos orgánicos refractarios de desechos peligrosos, a través de la destrucción de la fracción orgánica y su conversión a dióxido de carbono y vapor de agua. A menudo se utilizan combustibles auxiliares para iniciar y mantener la combustión.

Los sistemas de incineración están diseñados para destruir únicamente los componentes orgánicos de los residuos, sin embargo, no son los componentes exclusivos de los residuos peligrosos y éstos contendrán, tanto compuestos orgánicos combustibles como compuestos inorgánicos no combustibles. La incineración es un proceso de tratamiento que consiste en la transformación de los residuos en un producto gaseoso y un producto sólido relativamente inerte, en base a una combustión controlada vía oxidación a altas temperaturas. Los objetivos de esta técnica son la destrucción del residuo peligroso y con ello su peligrosidad y la obtención o recuperación de energía.

Desorción térmica de suelos: Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), la desorción térmica es una técnica para tratar tierras y lodos contaminados con compuestos peligrosos, calentándolos a temperaturas entre 90 °C y 540 °C, con el objetivo de vaporizar (se conviertan en gases) los contaminantes con un punto de ebullición bajo y, por consiguiente, se separen de la tierra o lodo. Los contaminantes vaporizados se recogen y tratan, generalmente con un sistema de captura y tratamiento de emisiones.

Ponderación de las técnicas de remediación

Para comparar y seleccionar las técnicas a aplicar en remediación se ha considerado las siguientes métricas de ponderación: factibilidad operativa de las técnicas, expectativas de aceptación por parte de autoridades, plazo de cumplimiento de metas y costos asociados a cada una de las mismas.

Tabla II. Ejemplo de ponderación de técnicas para un caso particular.

Tecnología de remediación	Métrica de remediación	Puntuación
Biorremediación in situ	Factibilidad operativa	0
	Expectativas de aceptación por parte de autoridades	2
	Plazo de cumplimiento	1
	Costos asociados	3
	Total puntos	**6**
Excavación, retiro y Biorremediación ex situ	Factibilidad operativa	5
	Expectativas de aceptación por parte de autoridades	4
	Plazo de cumplimiento	3
	Costos asociados	3
	Total puntos	**15**
Excavación, retiro y lavado de suelos	Factibilidad operativa	3
	Expectativas de aceptación por parte de autoridades	3
	Plazo de cumplimiento	3
	Costos asociados	3
	Total puntos	**12**
Excavación, retiro y desorción térmica	Factibilidad operativa	4
	Expectativas de aceptación por parte de autoridades	3
	Plazo de cumplimiento	5
	Costos asociados	1
	Total puntos	**13**
Excavación, retiro e incineración	Factibilidad operativa	5
	Expectativas de aceptación por parte de autoridades	4
	Plazo de cumplimiento	5
	Costos asociados	0
	Total puntos	**14**

Identificación y Valoración de los Impactos Ambientales durante las obras de remediación

Se formulan a continuación las acciones del proyecto o actividad sobre cada uno de los factores ambientales que podrían resultar impactados, en cada una de las etapas del ciclo de vida del proyecto (construcción, operación y abandono) [8]:
Afectación del medio físico: Movimiento de suelos, alteración de escurrimientos superficiales, modificación de la calidad del agua, contaminación del suelo, emisiones gaseosas, otras.
Afectación del medio natural: Desmonte (tala de especies nativas), introducción de especies exógenas, modificación de rutas migratorias, otras.
Medio socioeconómico: Sobreexplotación de la infraestructura existente, modificación del valor de las propiedades, alteraciones paisajísticas. Efectos sobre la salud o la calidad de vida, empleo y ocupación, otras.

Criterio de Evaluación para matriz de impacto ambiental destinada a obras de saneamiento o remediación de pasivos ambientales

En la Matriz diseñada se evalúa, para cada una de las interacciones, la Intensidad, Reversibilidad, Plazo de Manifestación y Extensión de la interacción entre cada acción y cada uno de los factores afectados. A tal efecto se desarrolla una guía para cuantificar especialmente la Intensidad (A), la Reversibilidad (B), Plazo de manifestación (C), Extensión (D) y el impacto que produce la interacción de cada acción del proyecto sobre cada factor**.**

Cuantificación de las características del impacto.

A: Intensidad del impacto. Esta guía destina la mayor parte de su contenido a desarrollar un método para cuantificar la intensidad de cada interacción de Acción sobre Factor. De cualquier manera, el lector notará que la interacción de una misma acción con diferentes factores puede cuantificarse de manera muy similar. Cuando la intensidad toma un valor de 1 hace referencia a una baja intensidad del impacto, 2 es una intensidad media, 3 es una intensidad alta y 4 es una intensidad muy alta del impacto [8].
B: Reversibilidad del impacto. Hace referencia a la posibilidad de revertir el impacto ("1"corresponde a una Alta probabilidad de que el impacto sea reversible a corto plazo, "2" que el impacto es medianamente reversible a corto o mediano plazo. "3" a un impacto poco probablemente reversible a Mediano/Largo plazo. "4" el impacto es irreversible, o reversible en muy largo plazo)[8].
C: Tiempo de manifestación es el tiempo por el cual se manifestará (perdurará) el efecto del impacto, desde su aparición. ("1" Menor a 1 mes, "2" tiempos de 1 mes a 1 año, "3" de 1 a 10 años, "4" más de 10 años)[8].
D: Extensión. La superficie afectada o abarcada por el impacto.

Clasificación de Impactos

Considerando los valores máximos y mínimos que se pueden obterner al valorar la Intensidad (A), la Reversibilidad (B), Plazo de manifestación (C), Extensión D) y el impacto que produce la interacción de cada acción del proyecto sobre cada factor, considerando una escala de valoración entre 0 y 4 para cada Acción frente a cada Factor, el máximo valor por celda a obtener es de 28 positivo o negativo. En función de los valores negativos, afectados por los valores positivos se obtiene el siguiente rango para la aplicación de la técnica seleccionada para la remediación del suelo contaminado [8] [9].

Tabla III. Clasificación de Impactos Ambientales

Impacto	Identificación	Rango	Clasificación
Compatible	**CO**	**0 - 7**	**(+) ó (-)**
Moderado	**MO**	**7 - 14**	**(+) ó (-)**
Severo	**SE**	**14 - 21**	**(+) ó (-)**
Crítico	**CR**	**21 - 28**	**(+) ó (-)**

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el Diagnóstico Ambiental y en el Análisis de Riesgos (ACR) deben ser específicos y exclusivos, de acuerdo con los parámetros de entrada disponibles en el momento de la ejecución del mismo, para cada sitio estudiado.

El estudio incluye una evaluación de las condiciones del emplazamiento, de acuerdo con los usos identificados y la información geológica disponible. La modelización se realiza bajo una serie de premisas precisas, basadas en el estado de conocimiento de los datos toxicológicos presentes y en función del conocimiento que el experto evaluador posee.

Toda evolución en los estándares y métodos analíticos, revisiones de los datos toxicológicos o variación de los escenarios planteados en el análisis de riesgos efectuado, podría invalidar los resultados obtenidos y las conclusiones finales definidas, debiendo ser necesaria una actualización del análisis para incorporar dichos cambios.

Dado que un estudio de precisión que permita evaluar los impactos ambientales generados por las acciones de saneamiento y/o remediación de los pasivos ambientales, ya caracterizados y evaluados en los yacimientos petroleros, requiere de mucho tiempo de desarrollo y estudio para cada caso en particular, hemos desarrollado una guía de valoración de impactos ambientales para las acciones y Factores Ambientales que consideramos de mayor incidencia en este tipo de obra, procurando minimizar y reducir el grado de subjetividad de esta evaluación, basándonos en criterio y experiencia de años de participación en las acciones de saneamiento y remediación que se han llevado a cabo en los distintos yacimientos de Argentina y en el exterior, los que no pueden ser extraídos de ningún manual de procedimientos. También, es importante aclarar que, debido a la naturaleza y generalidad de los casos que han sido considerados para elaborar esta guía, los valores que asumimos para cuantificar los índices A, B, C y D variaran entre 1 y 4, pero en ocasiones, puede exceder dichos valores.

CONCLUSIONES

Estos procedimientos destinados al tratamiento y gestión de suelos y residuos empetrolados generados en la actividad petrolera a través de una evaluación detallada de cada sitio afectado, permiten determinar el grado de afectación de los medios analizados y seleccionar las acciones correctivas más convenientes a aplicar en cada sitio, basados en un análisis de riesgos a la salud y al ambiente, minimizando los impactos ambientales que el conjunto de acciones puedan generar.

Dada la diversidad de los casos y variantes que pueden presentarse, solo se toma como modalidad de trabajo el empleo de la Normativa y la legislación vigente para la evaluación de la contaminación del suelo y de aquellas tecnologías que se han utilizado y pueden utilizarse en los procesos de remediación y tratamiento de suelos contaminados.

REFERENCIAS

[1] Toxicología Ambiental, Evaluación de Riesgos y Restauración ambiental. Carlos E. Peña, Dean E. Carter y Félix Ayala Fierro. Southwest Hazardous Waste Program, A Superfund Basic Research and Training Program, At the College of Pharmacy, The University of Arizona, 2001.
[2] GUÍA PARA LA EVALUACIÓN Y RECUPERACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS CONTAMINADOS. REPSOL-YPF.
[3] ASTM "Standards Relating to Environmental Site Characterization 2nd editions" revision 2010
[4] ASTM E 1689-95 (Reapproved 2008) Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites
[5] La Grega, Philip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans, (1996). Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos.

[6] Espinosa, G (2001 -2007) Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impactos Ambientales. Santiago, Chile. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).Centro de Estudios para el Desarrollo (CED).
[7] "Manual práctico de investigación de la contaminación del suelo" del IHOBE – (2002)
[8] Leopold, Luna B.; Clarke, Frank E.; Hanshaw, Bruce B.; Balsley, James R. (1971). A Procedure for Evaluating Environmental Impact. Geological Survey Circular 645. Washington: U.S. Geological Survey.
[9] Arroyo, S.C. – P (2007) Valoración de Impactos Ambientales, Sevilla. INERCO.

RELOCALIZACIÓN DE EVENTOS DE FRACTURA REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VOLCÁN PETEROA, ANDES CENTRALES, ARGENTINA-CHILE

Casas J. A.[1,2], Badi G. A.[1], Olivera Craig V. H.[1], Manassero M. C.[1], Draganov D.[3], Franco Marín L.[4], Gómez M.[5], Ruigrok E.[6]

[1]Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA
[3]Department of Geoscience and Engineering, Delft University of Technology, THE NETHERLANDS
[4]Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS-SERNAGEOMIN), Chile.
[5]ICES, CNEA, ARGENTINA
[6]Department of Earth Sciences, Utrecht University, THE NETHERLANDS

e-mail: acasas@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El conocimiento de la localización de las diferentes señales sísmicas resulta imprescindible para poder determinar cuáles son las regiones fuente y relacionar la actividad sísmica y la dinámica de los volcanes (*Chouet, 2003*). La capacidad de realizar una buena localización depende de varios factores tal como la calidad de los registros, el número de estaciones y componentes disponibles, la distribución acimutal de las estaciones en relación a la fuente, el conocimiento del medio por el cual se propaga la señal y el algoritmo aplicado.

El presente trabajo se origina en el marco de colaboración científica entre instituciones de Argentina, Holanda y Chile. El fin principal de este estudio es aportar a las bases científicas para una futura colaboración continua, al demostrar que el intercambio de datos, técnicas y conocimiento resulta en una mejor interpretación de la dinámica volcánica permitiendo a su vez un monitoreo más eficiente.

Desde el año 2010, el OVDAS mantiene una vigilancia instrumental sísmica permanente en el volcán Peteroa (35°15’ S; 70° 35’ W). Las señales son registradas por estaciones sobre el flanco occidental del volcán y su localización es volcada en reportes de actividad de acceso público y un catálogo de uso interno. Independientemente, utilizando datos de estaciones temporales registrados en 2012 por el proyecto MalARRgue (*Ruigrok, 2012*), la FCAG-UNLP identificó y localizó numerosos sismos de fractura.

Cada una de las redes instrumentales demuestra una significativa carencia de cubrimiento acimutal. Surge entonces la propuesta de relocalizar los eventos de fractura registrados por ambas redes para el período en común, utilizando así la mayor cantidad de estaciones disponibles y una mejor distribución relativa a las fuentes.

Se mostrarán resultados preliminares de la relocalización de los eventos, así como la interpretación de las zonas sismogénicas identificadas, mostrando una clara relación con las estructuras geológicas características de la región.

Palabras Clave:
Volcán Peteroa - Sismos de fractura - Relocalización - Estructuras Sismogénicas

INTRODUCCIÓN

En el contacto entre las placas Sudamericana y de Nazca, el arco magmático da claras manifestaciones de un tectonismo activo (ver Figura 1). Los volcanes ubicados en la Zona Volcánica de los Andes del Sur se encuentran a lo largo de la región limítrofe argentina-chilena y se caracterizan por sus erupciones explosivas, con emisiones de gases, cenizas y poco volumen de lava. La actividad eruptiva sumada a la geomorfología y la circulación atmosférica determinan el impacto sobre las poblaciones aledañas. Es así que las cenizas son transportadas por los vientos hacia el este fundamentalmente, sobre territorio argentino. Las recientes erupciones del volcán Villarrica (2015), Calbuco (2015), Copahue (2012 a 2014), Cordon-Caulle (2011), Hudson (1991 y 2011), Peteroa (2010-2011) y Chaitén (2008), muchas de ellas luego del terremoto en Chile del año 2010 (Mw 8.8), han despertado particular interés y preocupación en la comunidad científica internacional y en los organismos responsables de la prevención de estos eventos.

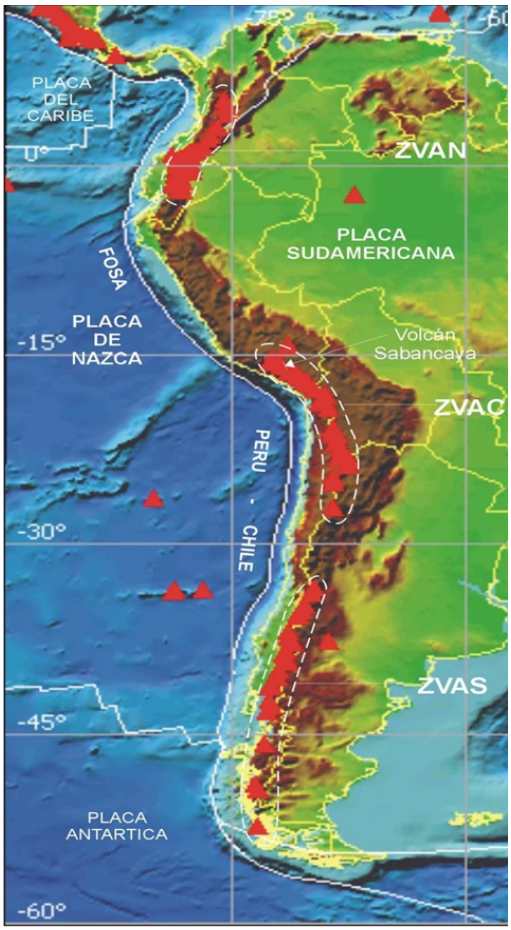


Figura 1. *Distribución de las principales zonas volcánicas (líneas blancas punteadas) sobre el borde occidental de América del Sur. ZVAN, ZVAC, ZVAS corresponden a las Zonas Volcánicas de los Andes del Norte, Central y Sur respectivamente [1].*

El Complejo Volcánico Planchón-Peteroa (CVPP) se ubica en la cordillera de los Andes (Ver Figura 2). Este complejo incluye tres cumbres principales: el volcán Planchón al norte, el volcán Peteroa en el centro y el cerro El Peñón al sur (volcán Azufre), producto de la migración del conducto principal a lo largo de su historia. Este aparato, ubicado a 95 Km NW de la ciudad de Malargüe y 45 Km SW del valle de Las Leñas (importante complejo turístico cordillerano), constituye el foco eruptivo actual del sistema volcánico. Sus últimas erupciones datan del 10 de Septiembre de 2010 y 22 de Junio de 2011, de carácter explosivo (VEI=2 y 3 respectivamente) y de estilo freatomagmático.

En la actualidad, el monitoreo del Peteroa es realizado por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur dependiente del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (OVDAS-SERNAGEOMIN, Chile) que cuenta con estaciones sismológicas desplegadas sobre el flanco occidental del volcán. Sus reportes de actividad volcánica declaran que el CVPP se caracteriza mayormente por eventos VT (Volcano-Tectónicos) con fuentes sismovolcánicas ubicadas principalmente hacia el NE del volcán activo, acompañados de eventos Largo Período y episodios de Tremor Volcánico estable de largo período. Esta

información es ratificada en el trabajo de Casas (2014) [2] mediante la utilización de registros sísmicos adquiridos por una red de estaciones ubicada en el flaco oriental del volcán.

Para la aplicación de algunas técnicas dedicadas al conocimiento de la estructura interna del volcán Peteroa, resulta necesaria una ubicación precisa de los focos. Se planteó entonces relocalizar aquellos eventos registrados por ambas redes de estaciones (argentina y chilena), las cuales, individualmente, no presentan una distribución de estaciones óptima para muchos de los eventos.

VOLCÁN PETEROA

El Complejo Volcánico Planchón-Peteroa (CVPP) es un complejo elongado con varias calderas superpuestas, originadas por distintos procesos de colapso durante su historia eruptiva. En sus alrededores existen varios glaciares, que dan nacimiento a importantes ríos. Del lado chileno podemos destacar al río Claro, que se une al río Teno, y a parte de la cuenca superior del río Colorado; por el lado argentino, al río de Valenzuela, que más adelante se transforma en el río Grande.

En cuanto a la construcción y evolución del CVPP, es aceptado el modelo de Tormey et al. (1989) [4] y modificado por Haller et al. (1994) [5], según el cual la actividad eruptiva comenzó en el Pleistoceno en un edificio volcánico inicial, de mayor volumen, denominado El Azufre, de características basáltico-andesítico a dacítico. Luego, se dio lugar a la generación del Planchón I a 6 Km al N de la estructura anterior, a partir de un conducto distinto que se abrió camino desde la cámara magmática hacia la superficie. En esta etapa, el complejo sufre un proceso de colapso de su estructura generando un hemicrater de visión hacia el W, con presencia de lahares de alcance hasta 75 Km hacia esa dirección. A partir de un lento ascenso de magma, se dio origen al Planchón II, dentro del aparato colapsado. Posteriormente, un desplazamiento de la actividad del complejo hacia el sur dio lugar al volcán Peteroa, andesítico a basáltico-andesítico.

En la actualidad, el sistema activo del CVPP corresponde únicamente al Volcán Peteroa. Este cuenta, dentro del registro de su actividad histórica, con una veintena de eventos eruptivos mayormente débiles, entre los cuales se destacan [6]:

- 1837, erupción durante la cual se habrían emitido lavas y dado lugar a la formación de lahares, que según las crónicas, habrían arrastrado bloques de hielo hacia el río Teno.
- 1991, erupción freatomagmática, con una columna eruptiva baja, expulsando cenizas a kilómetros de distancia y provocando contaminación en las aguas del río Claro. Se ha documentado presencia de lahares.
- 2010 y 2011, en este tiempo se registró actividad de variable magnitud, dentro de las cuales podemos destacar por ser mayores, aquellas que se originaron el día 10 de Septiembre de 2010 y 22 de Junio de 2011, de carácter explosivo y de estilo freatomagmático.

Actualmente, en el Peteroa opera un sistema hidrotermal alimentado por la fusión del casquete glacial y la infiltración de las aguas freáticas, habiéndose comprobado que estos fluidos interactúan con rocas sobrecalentadas por los niveles superiores de la cámara magmática [7]. La constante acción de fluidos pudo ser ratificada mediante caracterización sísmica [8], a partir del predominio de eventos volcánicos tipo Largo Período (LP) y Tremor en los registros.

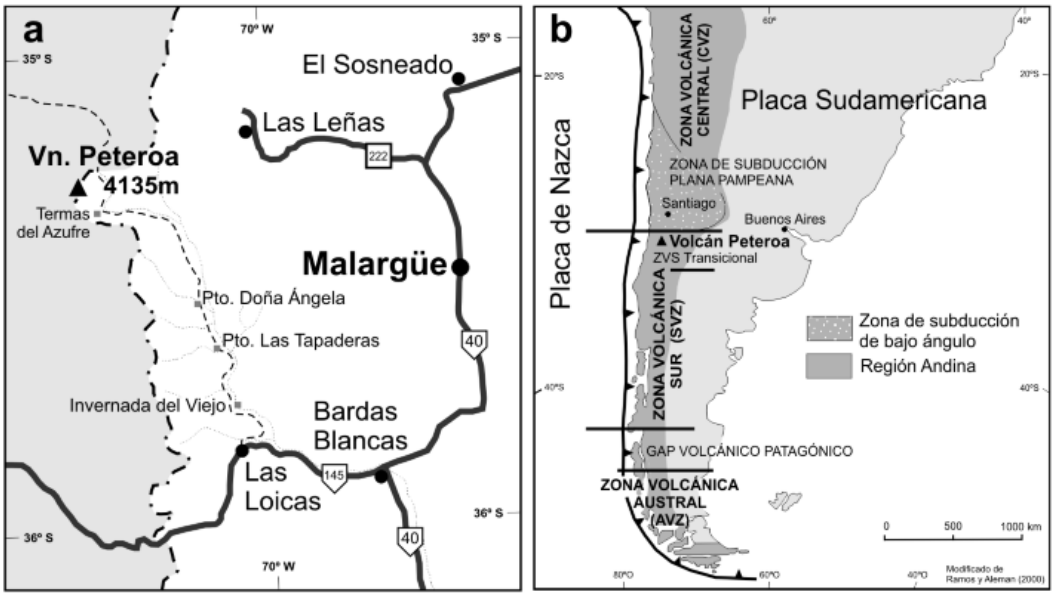


Figura 2. *a) Mapa de ubicación del volcán Peteroa y localidades cercanas; b) ubicación del volcán Peteroa en el contexto de las Zonas Volcánicas de la cordillera de los Andes [6].*

DATO UTILIZADO

Los datos analizados han sido provistos, por un lado, por una antena sísmica temporal de seis estaciones de corto período (2 Hz) desplegada en el flanco oriental del volcán por el proyecto MalARRgue (TUDelft, ICES-CNEA) [9] durante el año 2012. Las estaciones fueron provistas por el programa IRIS-PASSCAL, las cuales contaban con sensores de tres componentes en corto período (2 Hz) Sercel-L22. En cada estación, los datos fueron adquiridos en forma continua y a una frecuencia de 100 mps, siendo almacenados en archivos de una hora de duración y formato mseed.

Por otro lado, se han utilizado datos de seis estaciones banda ancha pertenecientes al Observatorio Volcanológico De los Andes del Sur (OVDAS-SERNAGEOMIN, Chile) ubicadas sobre el flanco occidental del volcán. Estas estaciones se encuentran equipadas con sensores Guralp y Trillium (30 segundos) de tres componentes, seleccionándose datos en el mismo periodo de registro que la antena del lado argentino y a la misma frecuencia de muestreo.

En la Figura 3 puede observarse la distribución superficial de las estaciones de ambas antenas.

APLICACIONES Y RESULTADOS

El OVDAS mantiene una vigilancia visual e instrumental permanente sobre la evolución y comportamiento eruptivo de los principales volcanes activos de Chile. En particular, la localización de la actividad sísmica registrada en el volcán Peteroa, desde el año 2010, es volcada en un catálogo de sismicidad que complementa a los reportes de actividad volcánica [3]. De manera independiente, en el trabajo de Casas et al. (2014a) [8] se han identificado, caracterizado y localizado diferentes tipos de eventos registrados por la antena sísmica desplegada al este del límite internacional, seleccionándose aquellos originados por procesos de fractura durante el año 2012. Como puede deducirse de la ubicación relativa de las estaciones en torno al volcán Peteroa (ver Figura 3) en cada red se observa una significativa carencia de cubrimiento acimutal. Surge entonces la propuesta de relocalizar los eventos de fractura registrados en común, utilizando la mayor cantidad de estaciones disponibles y con una mejor distribución relativa a las fuentes.

En este proceso, lo esperable es que la integración de la información desde ambas redes permita reducir los errores en la localización de hipocentros. Errores superiores a un cierto nivel de tolerancia conducirían a una incorrecta selección de los eventos a utilizar en las diferentes metodologías a aplicar y por lo tanto una mayor incertidumbre en los resultados.

A la fecha se han relocalizado un total de 352 eventos ocurridos entre los meses de enero y diciembre de 2012. En la Figura 3 se presentan las distribuciones de epicentros obtenidas en los diferentes procesos de localización:

a. Con puntos color amarillo, se señalan los epicentros calculados utilizando únicamente tiempos de arribo a la antena de 6 estaciones ubicada sobre el flanco oriental. Los hipocentros se determinaron

mediante inversión de tiempos de arribo, utilizando el programa Hypocenter [10] (el cual deriva del Hypo71 e implementado dentro del paquete SEISAN) y el modelo de velocidades propuesto por Bohm et al. (2002) [11] desarrollado para una zona cercana y estructuralmente similar a la de trabajo (Figura 4, curva azul). En este cálculo iterativo, se tomó como epicentro de partida el cráter activo del volcán y una profundidad inicial de 1 km.

b. Con puntos color rojo, se muestran los epicentros de los mismos eventos que en **a.** pero calculados por OVDAS, es decir, utilizando únicamente las estaciones sobre el flanco occidental y un modelo de velocidad adaptado de Bohm et al. (2002) (Figura 4, curva amarilla). En este caso el programa de localización utilizado fue el Hypo71.

c. Finalmente, con puntos color azul se presentan los epicentros del mismo conjunto de eventos pero en este caso localizados usando las lecturas de ambas antenas. Aquí, para los cálculos, se debió seleccionar aquella lectura de tiempo de arribo más representativa para las estaciones del flanco oriental, a partir de que este array trabaja como una única estación de peso 6 -seis- para la distribución total de estaciones.

En este proceso, se utilizó el modelo de velocidades sísmicas de Bohm et al. (2002) modificado y el programa Hypocenter. Se tomaron como valores iniciales los hipocentros calculados por OVDAS (punto **b.**).

En los casos **a.** y **c.**, las incógnitas (tiempo de origen, latitud, longitud y profundidad de los focos) fueron calculadas en tres etapas sucesivas:

1. Se fijaron las coordenadas espaciales, para un cálculo más preciso de los tiempos.
2. La profundidad se mantuvo fija, para un cálculo más preciso de la latitud y longitud de los focos.
3. Se estimaron los hipocentros sin restringir los grados de libertad del campo de variables.

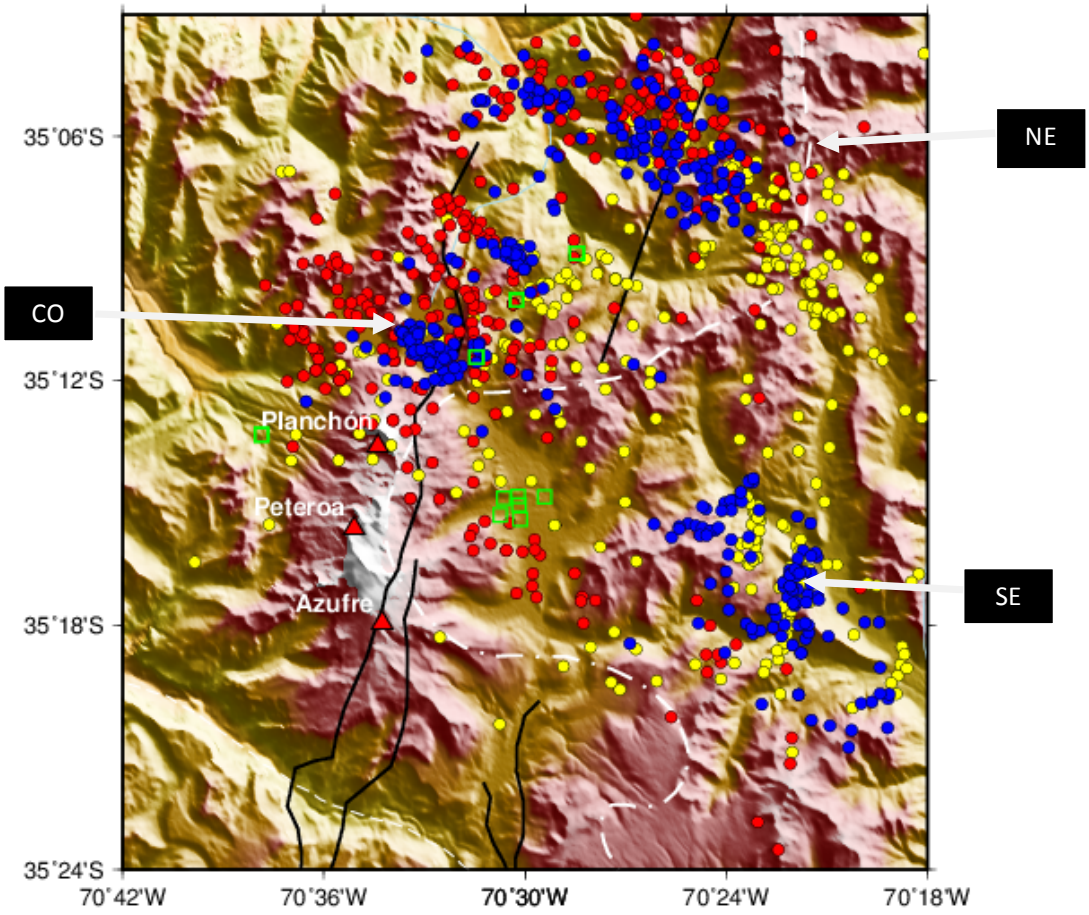


Figura 3. *Distribución de sismos de fractura localizados utilizando lecturas de tiempos de arribo a las estaciones chilenas (puntos rojos), a las estaciones argentinas (puntos amarillos), y el resultado de la relocalización utilizando todas las estaciones (puntos azules). Los recuadros señalan las tres áreas sismogénicas identificadas: NE, CO y SE. Las estaciones se indican con cuadrados verdes.*

A simple vista, en la Figura 3 podemos identificar claramente tres zonas sismogénicas principales a las que identificaremos como NE, CO y SE por su distribución geográfica en el área de trabajo. Asimismo, quizás el aspecto más destacable de este resultado es la menor dispersión de los epicentros al nuclearse en áreas más acotadas. Puede verse entonces que la utilización de ambas redes en conjunto logra una mejor cobertura de las áreas sismogénicas que cada una por sí sola. Teniendo en cuenta los diferentes hipocentros de partida y distribuciones de estaciones considerados en cada cálculo, se esperaría una mayor dispersión de los resultados obtenidos en las tres localizaciones (**a., b. y c.**). La concentración de epicentros finales (**c.**) hacia el centro de las áreas sismogénicas previas (**a.** y **b.**) y su más clara asociación a las estructuras superficiales reconocidas, permiten suponer que en principio el método de localización utilizado posee una buena convergencia para estos eventos y distribución de estaciones.

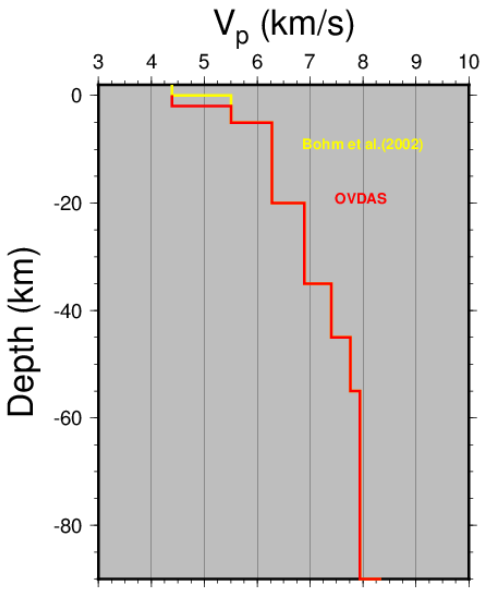


Figura 4. *Modelos de velocidad utilizados en los procesos de localización de sismos de fractura en el CVPP. La curva amarilla representa el modelo de Bohm et al. (2002) mientras que la curva roja es el modelo adaptado de Bohm et al. (2002), utilizado por OVDAS y en la relocalización.*

En la Figura 5 se observan los desplazamientos de los epicentros localizados por OVDAS por efecto de la relocalización. Si bien en los métodos de localización por inversión de tiempos es habitual que los epicentros tiendan a dirigirse hacia la zona donde se encuentra la red, en este caso dicho efecto no es tan obvio. En particular,

- En el grupo NE, las nuevas localizaciones no difieren significativamente respecto de las originalmente localizadas por OVDAS, esto es, en su gran mayoría se encuentran dentro de los errores estimados. Básicamente esto se debe a que, para la ubicación de estas coordenadas hipocentrales, la cantidad total de estaciones posee una distribución muy similar a la anteriormente utilizada por OVDAS individualmente. Es decir, el efecto de la estación agregada no genera un cambio en las nuevas ubicaciones.
- Para los grupos CO y SE, se observa que existen mayores diferencias, incluso eventos ubicados originalmente en el grupo CO son reubicados al grupo SE. Esto surge de la geometría de estaciones utilizada en la relocalización, en la cual la nueva estación (aquella situada del lado argentino y más representativa del array oriental para cada evento) aporta una mejor definición de las coordenadas longitudinales.

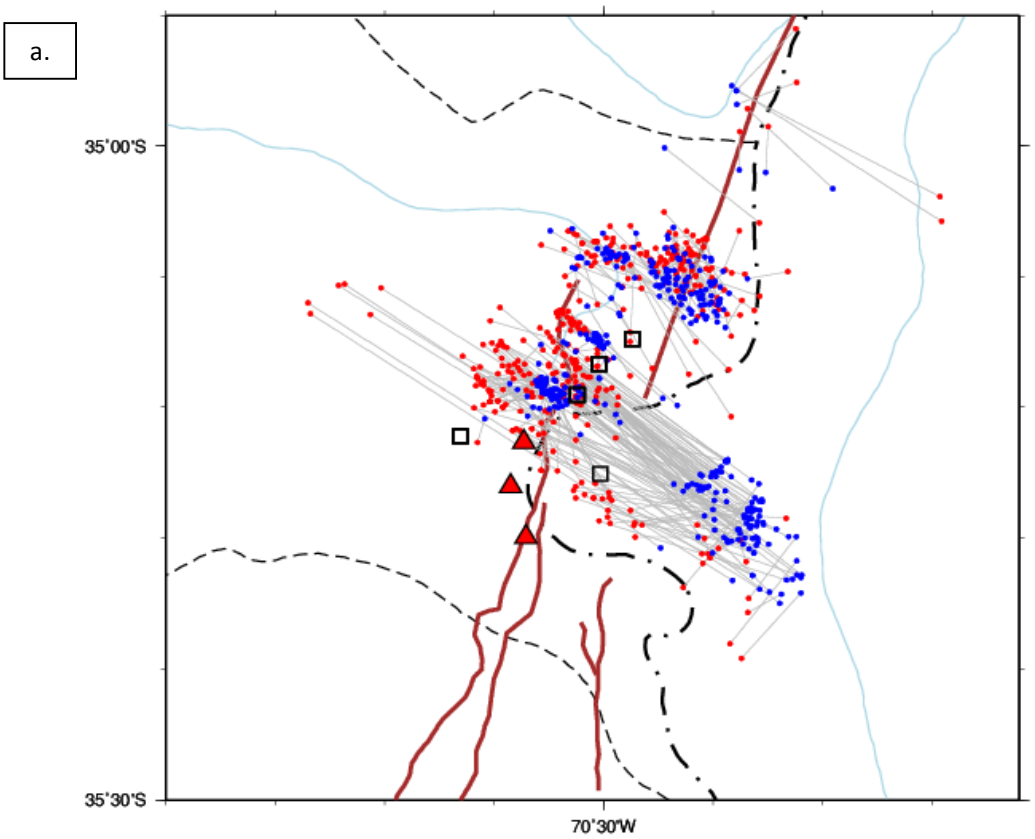


Figura 5. *Vectores de desplazamiento (líneas grises) de epicentros calculados utilizando las estaciones chilenas (puntos rojos) hasta su relocalización (puntos azules) utilizando las estaciones desplegadas por OVDAS y sólo una de las ubicadas en el flanco oriental.*

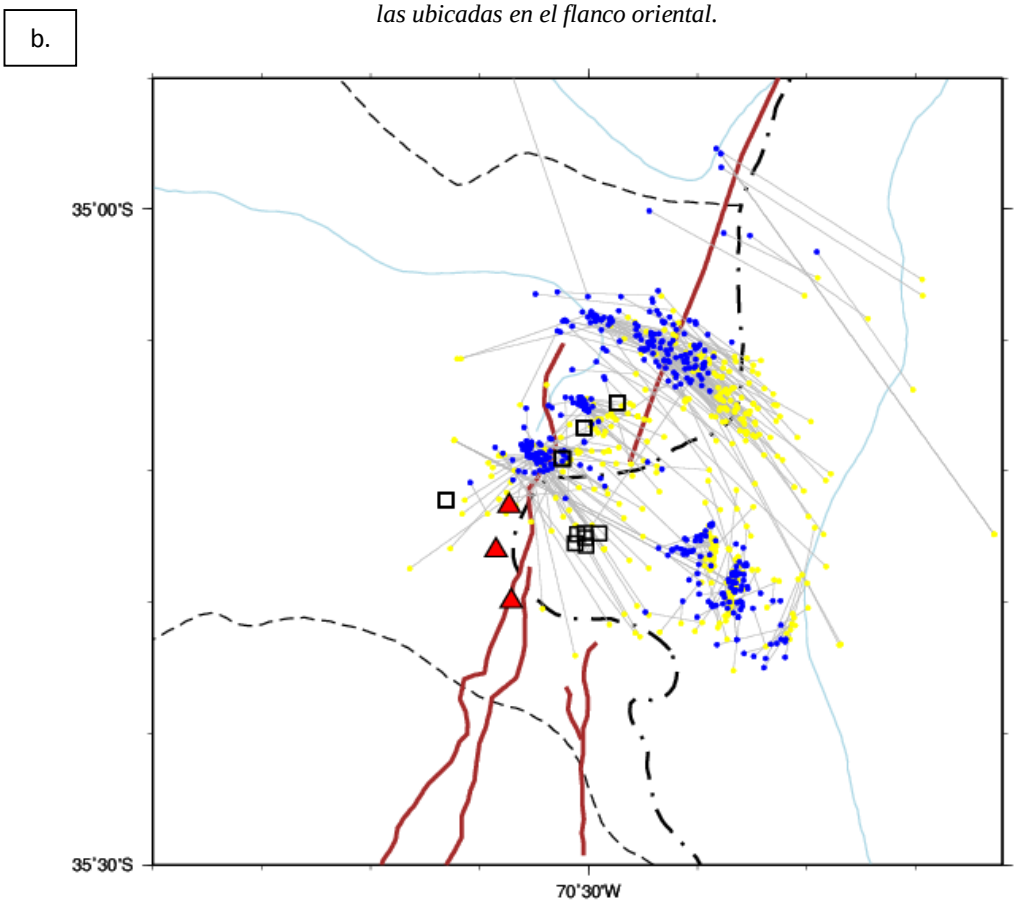
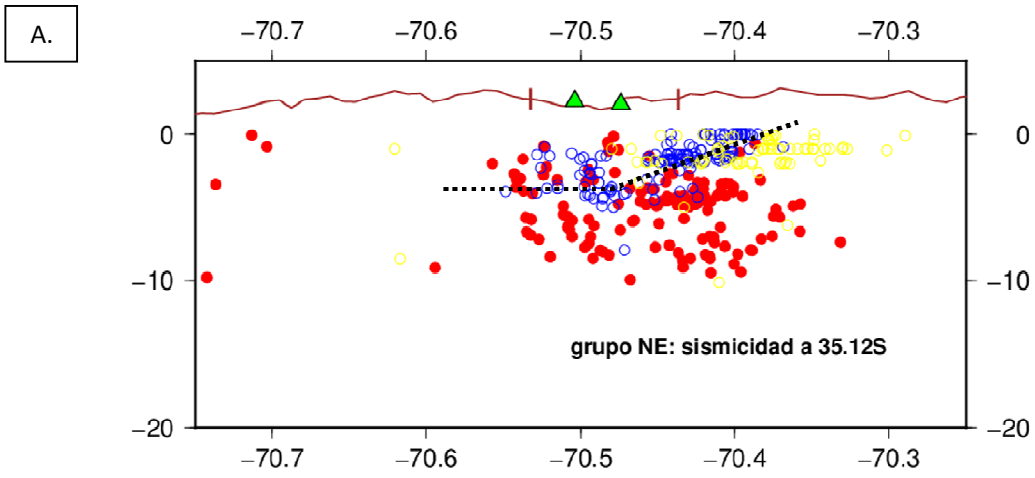


Figura 6. *Vectores de desplazamiento (líneas grises) de epicentros calculados utilizando las estaciones argentinas (puntos amarillos) hasta su relocalización (puntos azules) utilizando las estaciones desplegadas por OVDAS y sólo una de las ubicadas en el flanco oriental.*

La distribución de los eventos relocalizados en comparación con aquella obtenida usando solo las estaciones del lado argentino (Figura 6 b.) muestra un menor desplazamiento de los eventos que en el caso de las localizaciones preliminares del OVDAS (Figura 6 a.). La apretada distribución de estaciones de la antena argentina resulta en una muy baja resolución acimutal comportándose casi como una única estación para los eventos más lejanos. En este caso, la diferencia entre los primeros arribos entre estaciones es poco significativa frente a la diferencia de tiempos entre las fases P y S en cada estación, lo que resulta en distancias epicentrales aceptables. En los 3 grupos puede observarse que las distancias han sido correctamente calculadas y que la mayor diferencia es en la dirección acimutal.

Las Figuras 7. A., B. y C. muestran las distribuciones de los sismos en profundidad para las distintas zonas dentro de la región de trabajo, es decir, para los grupos NE, CO y SE respectivamente. Los perfiles topográficos fueron confeccionados seleccionando una latitud representativa de cada grupo. Aquí puede observarse:

- Las localizaciones obtenidas por OVDAS poseen una mayor dispersión para cada zona, no permitiendo en ningún caso asociarlas a alguna característica estructural particular.
- Una gran cantidad de las localizaciones realizadas por la antena del lado argentino resultan muy superficiales, mientras que otra cantidad se ubican de manera dispersa en el subsuelo.
- Las relocalizaciones nuevamente demuestran la característica concentración de sismos. Además, analizando la ubicación de los sismos en superficie (Figura 3) en conjunto con el perfil del grupo SE (Figura 7.C.), es posible definir 3 diferentes núcleos de sismos, distribuyéndose con similar inclinación pero en diferentes sectores hipocentrales. Esto resultaba imposible de delinear en las localizaciones previas (OVDAS y antena argentina)
- El rango de profundidades en todos los grupos zonales se encuentra principalmente entre 0 y 10 km, extendiéndose a los 20 km al SE del complejo. Este resultado concuerda con la información geológica obtenida para la zona (ver apartado *Interpretación Geológica*).



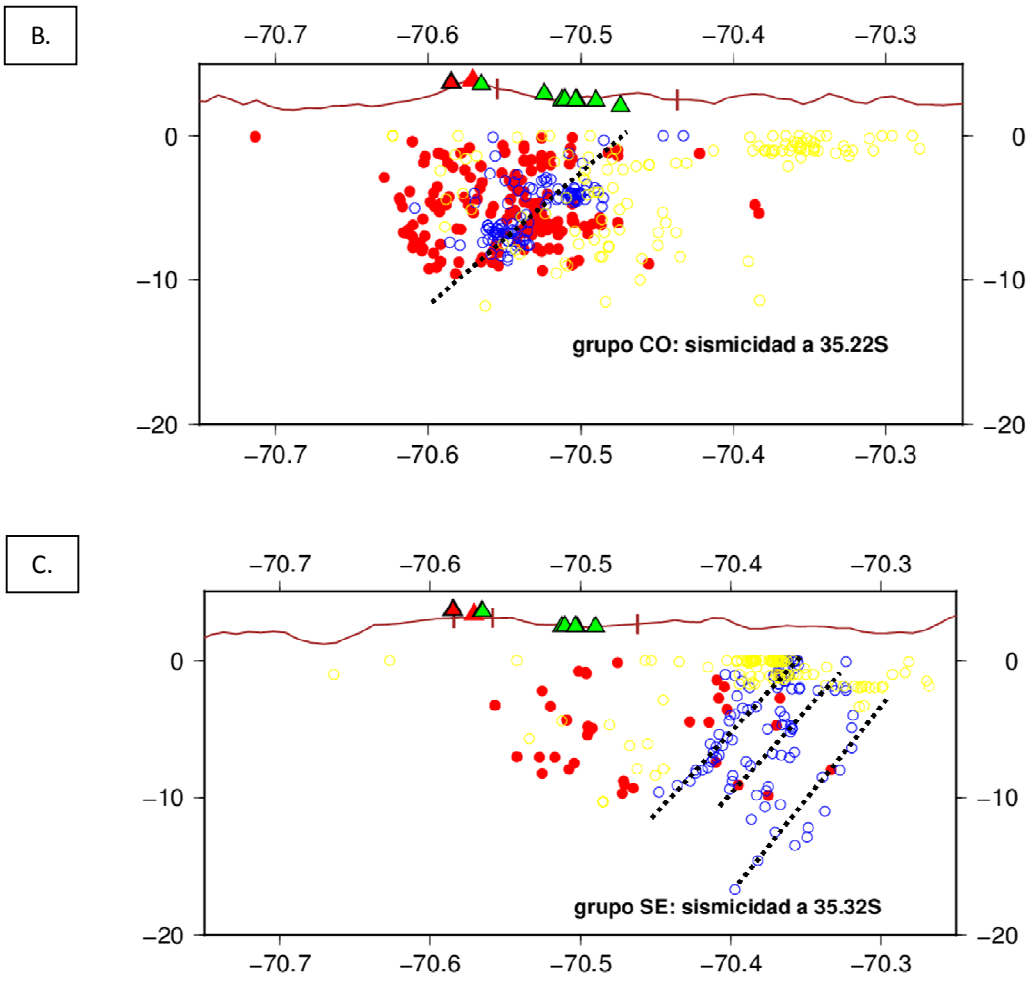


Figura 7.A., B., y C. *Distribución de eventos de eventos en profundidad para los grupos NE, CO y SE respectivamente. Círculos azules: relocalizaciones. Círculos amarillos: localización por antena argentina. Puntos rojos: localización por OVDAS. Líneas negras punteadas: interpretación geológica.*

Interpretación Geológica

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Principal en los Andes Centrales (ver Figura 8). El mecanismo de deformación de esta zona ha sido interpretado como el desarrollo de corrimientos de bajo ángulo e inversión de fallas normales de alto ángulo. Las primeras serían estructuras relativamente más jóvenes de orientación NS a NNE, mientras que las segundas, corresponderían a estructuras formadas durante la extensión mesozoica e invertidas durante la compresión cenozoica con una orientación NNO a NO [12]. Estas fases de tectónica compresiva acaecidas durante el Cretácico superior y el Terciario, provocaron la inversión de las estructuras extensionales mesozoicas dando origen a la faja plegada y corrida de Malargüe (FPCM), que en esta zona tiene un comportamiento predominante de piel gruesa, caracterizado por una serie de bloques de basamento que limitan zonas internas de deformación de piel delgada [13] [14] [15] [16] [17].

La región en estudio está constituida por potentes secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias terciarias del lado chileno [18] [19], unidades que del lado argentino están en contacto con secuencias sedimentarias, marinas y continentales mesozoicas acumuladas entre el Jurásico y Cretácico inferior en el borde occidental de la Cuenca de Neuquén. El contacto entre ambos dominios ha sido interpretado como una de aquellas fallas resultantes de la reactivación inversa de fallas normales, ubicada en el borde oriental de la cuenca de Abanico [20] [21]. Esta estructura ha sido asimilada a la falla El Fierro [22], de rumbo aproximado N-S y una inclinación de 40° W [23].

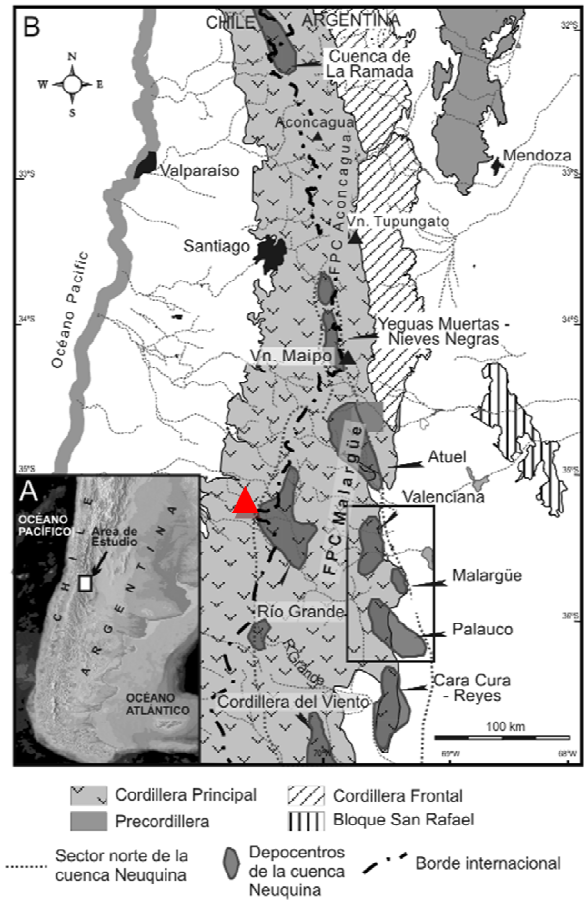


Figura 8. *Ubicación de la Cordillera Principal, de la FPC -Faja Plegada y Corrida- de Malargüe, y el volcán Peteroa (triángulo rojo). Fuente: Giambiagi et al., 2009.*

Benavente Zolezzi (2010) [7] presentó un modelo conceptual del sistema hidrotermal asociado al CVPP (ver Figura 9.A.), modificando el establecido anteriormente por Tapia (2010) [24]. Este se basa en la interpretación de los resultados geológicos, considerando tanto la caracterización química de los fluidos termales de la zona, como también el análisis de alteraciones, temperatura y estructuras mediante imágenes satelitales.

Los rasgos geológicos de la zona demuestran que existe una estrecha relación entre la tectónica y vulcanismo. La primera consecuencia de esta relación es la creación de espacio para el ascenso de los magmas a través de estructuras (como consecuencia de la tectónica), donde se emplaza y/o transporta el magma; y a su vez, el calor y la sobrepresión magmática debilitan la roca, favoreciendo la propagación de las estructuras [25]. Basado en lo anterior, Cembrano et al. (2009) [25] plantea que debido a que la cubierta Meso-Cenozoica se encuentra sometida a una compresión de intraarco y, suponiendo periodos de baja presión de fluidos, el magma se encontraría formando reservorios horizontales con tiempos de residencia suficiente para la cristalización fraccionada y la consecuente diferenciación magmática. Una vez que la presión de fluido se incrementa hasta valores cercanos a la presión litostática, debido a la cristalización fraccionada de minerales anhidros, las fallas inversas preexistentes o recientemente creadas conectan las cámaras magmáticas horizontales con niveles horizontales más someros, generando niveles de emplazamiento de magmas cada vez más diferenciados. A su vez, la deformación dextral de la corteza superior generaría grietas tensionales de rumbo NE que se ven reflejadas en fallas de alto ángulo que marcan contactos regionales entre las secuencias Meso-Cenozoica, siendo estas los conductos para el ascenso de los magmas y explicando la distribución espacial del CVPP [25].

Estudios geológicos e interpretaciones sísmicas obtenidos para este sector de los Andes han declarado una deformación por despegue, propagación y flexión de falla, siendo el despegue a una profundidad de 10 km aproximadamente, como muestran las Figuras 9.A. y 9.B. [12] [26] [27] [28].

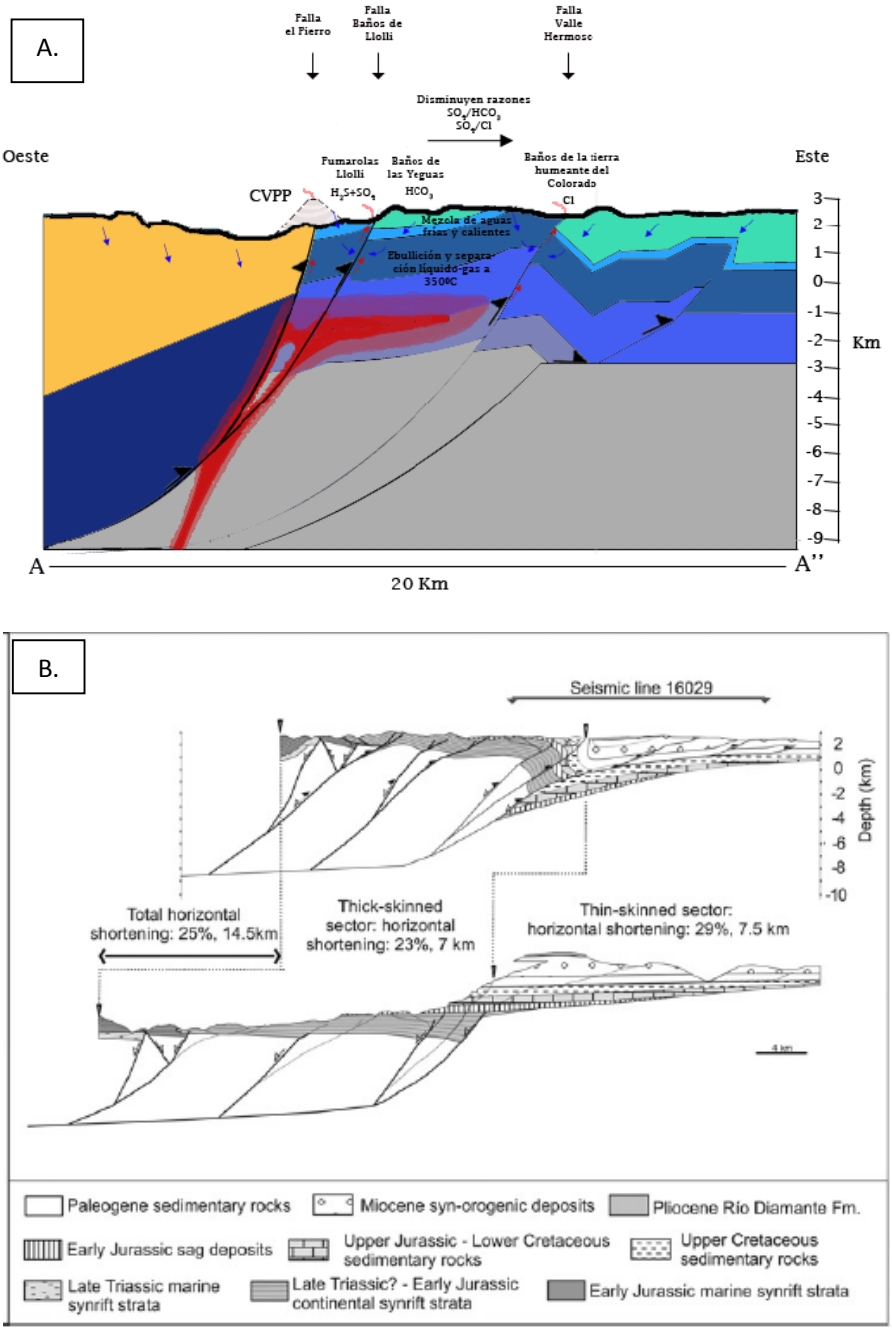


Figura 9.A. *Modelo conceptual para la zona de estudio presentado por Benavente Zolezzi (2010) a los 35°S de latitud.*
Figura 9.B. *En la parte superior, modelo estructural para la zona de estudio (Mescua y Giambiagi, 2012) basado en una línea sísmica de latitud 34°55' S.*

En los gráficos 5 A., B. y C., con líneas punteadas color negro, se muestran las posibles trazas de las fallas interpretadas para la región. Si bien debe tenerse en cuenta que esta relocalización es preliminar, parecería clara la correlación existente entre los resultados obtenidos en la relocalización y las estructuras geológicas del subsuelo. Específicamente,

- El perfil en profundidad del grupo NE resulta ajustar correctamente a los modelos mostrados en las Figuras 9.A. y B. El segmento horizontal correspondería a una zona de despegue somera, a los 4 km de profundidad aproximadamente. El segmento inclinado correspondería a uno de los fallamientos originados por el campo de esfuerzos inducido en estas zonas, o bien, a una propagación de la falla dispuesta horizontalmente.
- El perfil en profundidad del grupo CO también se correlaciona con los modelos observados en las Figuras 9.A. y B. Estos sismos, ubicados más hacia el oeste comparando con el grupo NE, ajustan correctamente un plano de falla, siendo interpretado como el correspondiente a la falla Baños de Llolli (Figura 9.A.).

- Como se ha expresado anteriormente, el grupo SE puede separarse en 3 sub-grupos a partir de su disposición en planta y en profundidad. En la figura 10 se encuentran representados las ubicaciones de los sismos del grupo SE. Esto permite interpretar que los sismos de este grupo son la expresión de una región sismogénica con mayor inclinación hacia el SW y que se profundiza hacia el SE.

De lo analizado, se hace clara la necesidad de la elaboración de perfiles geológicos específicos para la zona de trabajo, con el objeto de dilucidar la incertidumbre en la interpretación y/o validar los resultados.

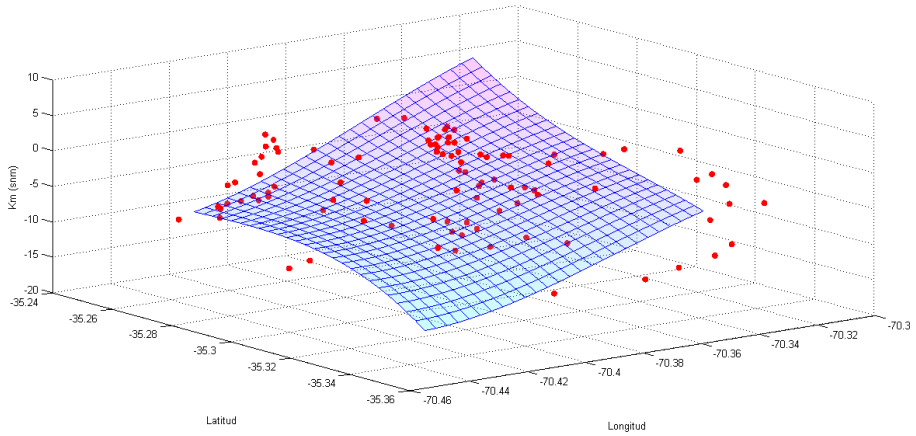


Figura 10. *Interpretación estructural de la región sismogénica para el grupo SE.*

Análisis de Errores

La tabla I muestra los valores promedios de los errores obtenidos en la localización de los eventos de fractura registrados por las redes de estaciones argentina y chilena. Allí se puede ver que los correspondientes al proceso de relocalización y los obtenidos por OVDAS, son comparables. Los errores obtenidos utilizando solamente la antena argentina resultaron mucho mayores, lo cual era esperable dada la distribución relativa entre epicentros y estaciones.

Se observa que las relocalizaciones disminuyeron notablemente los errores obtenidos utilizando solamente la antena argentina pero no lograron mayor precisión que la localización del OVDAS. Por otra parte, los desplazamientos de los epicentros en los grupos CO y SE indican que la incorporación de los datos de la antena argentina permitió disminuir la dispersión de epicentros pero en algunos casos varió el backazimuth en 180°. Todo esto parece sugerir que los tiempos de arribo relativos entre estaciones de una y otra red son consistentes pero podría haber diferencias de criterio en las lecturas de ambas redes.

Tabla I. *Promedio de errores obtenidos en el cálculo de las coordenadas hipocentrales y tiempo origen de los eventos registrados*

Errores	**Relocalizaciones**	**OVDAS**	**Antena argentina**
RMS	0,08	0,04	0,11
Eh	6,74	3,52	17,61
Ez	7,26	1,86	14,42

.

DISCUSIÓN

La necesidad de una precisa ubicación de las fuentes resulta primordial para la correcta aplicación de diferentes técnicas dedicadas a la caracterización de un sistema volcánico. Por ello se planteó relocalizar eventos anteriormente registrados y localizados independientemente por las redes de estaciones argentina y chilena, resultando que:

- ✓ El método de localización utilizado posee una correcta convergencia para los eventos y distribución de estaciones presentes en la zona.
- ✓ Las relocalizaciones correlacionan con éxito la información de la distribución de fallas geológicas del subsuelo de la región. Esto permite dar un primer paso en la estimación de cuáles son las áreas de mayor liberación energética.

- ✓ La ubicación de sismos resulta óptima para la aplicación de diferentes metodologías (por ejemplo aquellas basadas en la técnica interferometría sísmica) en estaciones chilenas y argentinas.

En este trabajo, la relocalización de eventos fue realizada a partir de un algoritmo que involucra un análisis de cada evento individualmente. Una mayor precisión en los resultados se lograría aplicando un algoritmo de localización que involucre, en cada cálculo, los datos aportados por un conjunto de sismos. De esta manera, las imperfecciones presentes en el modelo de velocidades aportarían un efecto mucho menor. Este trabajo constituye la principal tarea a futuro.

Se agradece especialmente al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina, a IRIS - PASSCAL de EEUU, a la Municipalidad de Malargüe, Mendoza, a Defensa Civil y al Proyecto Pierre Auger, por el apoyo para la implementación de la red sísmica.

REFERENCIAS

[1] Tavera, Antayhua, 2003. Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya.
[2] Casas, 2014. Characterization of Seismo-volcanic Activity in Peteroa Volcano, Mendoza. Graduate thesis on Geophysics. FCAGLP-UNLP, 65 pp.
[3] Reportes de Actividad Volcánica (RAV), 2012. Región del Maule, SERNAGEOMIN.
[4] Tormey, Frey, Lopez-Escobar, 1989. Geologic history of the active Azufre- Planchón-Peteroa Volcanic Center (35°15'S, southern Andes) with implications for the development of compositional gaps. Revista de la Asociación Geológica Argentina 44(1-4): 420-430.
[5] Haller, Ostera, Pesce, Gardini, Folgueras, 1994. Vulcanoestratigrafía reciente y eruptividad del volcán Peteroa. Congreso Geológico Chileno, N 7, Concepción, Actas 1, 319-323
[6] Haller, Risso, 2011. La erupción del Volcán Peteroa (35º15'S, 70º18'O) del 4 de septiembre de 2010. Revista de la Asociación Geológica Argentina 68 (2): 295 – 305.
[7] Benavente Zolezzi, 2010. Actividad Hidrotermal asociada a los Complejos Volcánicos Planchón-Peteroa y Descabezado Grande-Quizapu-Cerro Azul, 36°S y 37ºS, Zona Volcánica Sur, Chile. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, 204 pp.
[8] Casas, Badi, Manassero, Ruigrok, Gomez, Draganov, Ruzzante. Characterization of Seismo-volcanic Activity in Peteroa Volcano, Central Andes Argentina-Chile, 2014a. III Latin-American Congress of Seismology. Bogotá, Colombia.
[9] Ruigrok, Draganov, Gomez, Ruzzante, Torres, Lopes Pumarega, Barbero, Ramires, Castano Ganan, van Wijk, Wapenaar, 2012. Malargüe seismic array: Design and deployment for the temporary array. The European Physical Journal Plus, 127, doi:10.1140/epjp/i2012012126-7.
[10] Ottemöller, Voss, Havskov, 2012. Seisan earthquake analysis software for windows, solaris, linux and macosx. Department of Earth Science, University of Bergen and Geological Survey of Denmark and Greenland. 379 pp.
[11] Bohm, Lüth, Asch, Bataille, Bruhn, Rietbrock, Wigger, 2002. The Southern Andes between 36°S and 40°S latitude: seismicity and average velocities. Tectonophysics, Vol. 356, p. 275-289.
[12] Giambiagi, Ghiglione, Cristallini, Bottesi, 2009. Características estructurales del sector sur de la faja plegada y corrida de malargüe (35°-36°s): distribución del acortamiento e influencia de estructuras previas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (1): 140 - 153 (2009).
[13] Ploszkiewicz, 1988. Propuesta de perforación del pozo YPF. MdN.CDJx-1 (Cerro Doña Juana). YPF, (inédito), 12 p., Buenos Aires.
[14] Manceda, Figueroa, 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold-thrust belt, Mendoza, Argentina. En Tankard, A.J., Suárez, R., Welsink, H.J. (eds): Petroleum Basins of South America. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 369-382.
[15] Rojas, Radic, 2002. Estilos de deformación del basamento y de la cobertura sedimentaria en la faja plegada y fallada de Malargüe en el área de Puesto Rojas, Mendoza, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino (El Calafate), Actas 2: 224-229.
[16] Silvestro, Kraemer, 2005. Evolución tectosedimentaria de la Cordillera Principal en el sector surmendocino a los 35º30´S. Faja Plegada de Malargüe. República Argentina. 6º Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos (Mar del Plata), CD.
[17] Dicarlo, Cristallini, 2007. Estructura de la margen norte del río Grande, Bardas Blancas, Provincia de Mendoza. Revista de la Asociación Geológica Argentina 62: 187-199.
[18] Aguirre, 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, Boletín Nº 9, 70 p.
[19] Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provs. de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín Nº 8, 95 p.
[20] Charrier, Baeza, Elgueta, Flynn, Gans, Kay, Muñoz, Wyss, Zurita, 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33º-36º S.L.). Journal of South American Earth Sciences, Vol. 15, p. 117-139.
[21] Zapatta, 1995. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructura del área de Termas del Flaco, valle del río Tinguiririca, VI Región, Chile. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 122 p.
[22] Davidson, 1971. Tectónica y paleogeografía de la Cordillera Principal en el área de la Nacientes del Teno Curicó, Chile: Memoria, Depto. de Geología. Univ. de Chile, Santiago, 160 p.
[23] Parada Morales, 2008. Análisis estructural del borde oriental de la cuenca terciaria de abanico en el valle del río Teno, 7ma región. Memoria para optar al titulo de geólogo. Universidad De Chile. Facultad De Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
[24] Tapia, 2010. Análisis estructural del sector occidental de la Faja Plegada y Corrida de Malargue en el área de Valle Grande, región del Maule. Chile (35º23'S). Departamento de Geología, Universidad de Chile.

[25] Cembrano, Lara, 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. Tectonophysics 471(1-2): 96-113.
[26] Manaceda, Figueroa, 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold thrust belt, Mendoza, Argentina. Petroleum Basin of South America. American Association of Petroleum Geologist. A. J. Tankard, R. Suarez and J. Welsink. Memoir: 369-382.
[27] Farias, Comte, 2010. Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. Tectonics 29: 22.
[28] Mescua, Giambiagi, 2012. Fault inversion vs. new thrust generation: A case study in the Malargüe fold-and-thrust belt, Andes of Argentina. Journal of Structural Geology 35 (2012) 51-63.

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MORFOMÉTRICO PARA IDENTIFICAR VULNERABILIDAD DE RIESGO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RIO SAN JERÓNIMO- CHUMBICHA- CAPAYÁN CATAMARCA

Cejas, Gabriel [a, b]; *Niz Adriana* [a, b]

[a]*Cátedra de Geomorfología – Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas- UNCa*
[b]*Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental (IMCoDeG)- Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas- UNCa*

Gabriel.cejas92@gmail.com

RESUMEN

La cuenca del rio San Jerónimo drena la localidad de Chumbicha, Capayán, a 88 km. al suroeste de la Capital de Catamarca, se accede por RN N° 38. Chumbicha se asienta sobre un abanico aluvial en el piedemonte oriental de la Sierra de Ambato.
El análisis de las características morfométricas de una cuenca hidrográfica, es básico para su aplicación en la modelación hidrológica para determinar la dinámica y captación pluvial.
Se caracterizó morfométricamente la cuenca, mediante la aplicación de software adecuado, para establecer y analizar los parámetros morfométricos mediante cálculos realizados a partir de una imágen satelital QuickBird de resolución 60x60 del terreno-ETISIG Catamarca-. Se obtuvieron los parámetros: área, longitud y ancho de la cuenca, índice de Gravelius, forma, jerarquización de la red fluvial, densidad de drenaje, pendiente media de la cuenca, y del cauce principal. Todos los parámetros obtenidos con esta investigación facilitan la comprensión del comportamiento hídrico de la cuenca.
El conocimiento del relieve montañoso admite caracterizar las pendientes que determinan la ocurrencia de los procesos erosivos en las laderas, que aportan los sedimentos a los cauces inferiores y a áreas urbanizadas, originando abanicos aluviales en la desembocadura de la cuenca, que posteriormente van a evolucionar mediante eventos geomorfológicos.
Se concluye que la cuenca del Rio San Jerónimo, presenta características propicias para la captación de una gran cantidad de agua debida a su forma subredondeada y los valores morfométricos obtenidos, además se encuentra en un periodo de alta degradación, con material suelto en laderas y lechos de cauces, de manera que representa una cuenca de medio a elevado riesgo hídrico

Palabras Clave: Análisis morfométrico; Cuenca hidrográfica; Riesgo hídrico

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo se realizó en la localidad de Chumbicha – Dpto. Capayán, en la ladera oriental de la Sierra de Ambato, está inmerso en la provincia geológica de sierras pampeanas, compuesta por basamento cristalino principalmente esquistos y migmatitas.
El río San Jerónimo se genera por la confluencia de los ríos que discurren por la Quebrada del Agua y Quebrada del Pino con rumbo noroeste en la zona cumbral, limitando por su divisoria de aguas con el Dpto. Pomán; el Río San Jerónimo abastece a la Población de Chumbicha de agua para riego y agua potable.
La metodología empleada consistió en realizar el análisis morfométrico de las diversas subcuencas que abastecen la cuenca principal del Rio San Jerónimo, a partir del estudio de los parámetros generales de la cuenca, los que permiten definir cualitativa y cuantitativamente la forma de la cuenca y el diseño y distribución de la red de canales, con el fin de poder estimar y monitorear el comportamiento de la cuenca frente a diversas situaciones meteorológicas, como es el caso de precipitaciones extraordinarias, y determinar las posibles áreas de vulnerabilidad para prevenir eventos de riesgo que afecten a la población.

Las precipitaciones son de régimen torrencial suceden principalmente en período estival, se caracterizan por su corta duración, crecientes violentas y un importante poder erosivo.
El material acumulado es producto de estos procesos de erosión provenientes de las distintas subcuencas. El Rio San Jerónimo al ser un rio estacionario, transporta durante las elevadas precipitaciones, el material erosionado yacente en las laderas, de tal manera que el acopio de material provoca barreras en el canal principal, a veces genera endicamientos, por lo que puede ser el agente desencadenante de aludes y aluviones

Ubicación

La localidad de Chumbicha es la cabecera departamental del Departamento Capayán, se encuentra ubicada a 86 Km de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, se accede a ella por Ruta Nacional N°38. Está ubicada sobre el abanico aluvial generado por el Rio San Jerónimo, cuyas aguas son drenadas al Rio del Valle. También se puede arribar desde el Sudoeste, por la Ruta Nacional N°40; desde el oeste de la Provincia de Catamarca se accede mediante la Ruta Nacional N° 60, la cual atraviesa la Localidad de Aimogasta, la quebrada de La Cébila y se intercepta con la Ruta Nacional N° 38.

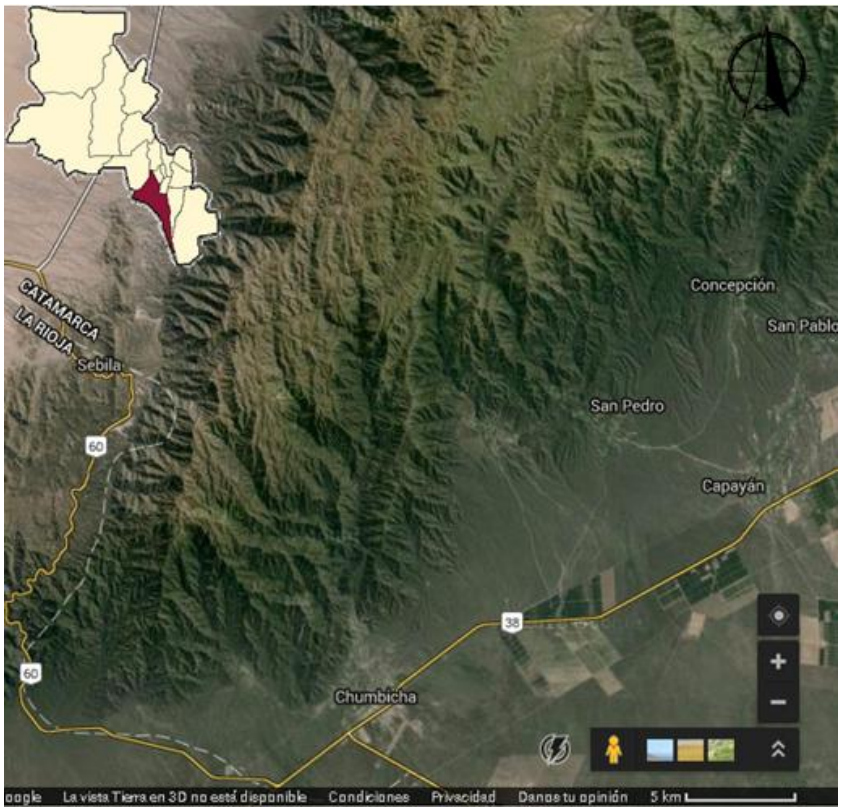


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Marco Geológico

El Departamento Capayán, localidad de Chumbicha, se encuentra dentro de la provincia geológica denominada Sierras Pampeanas [1]Stelzner, 1873 para comprender una serie de sierras formadas por esquistos cristalinos o metamórficos que emergían de las pampas circundantes.
El Basamento está constituido de rocas metamórficas de edad precámbrica – paleozoica inferior. Hacia el sur de la Sierra de Ambato afloran pizarras, filitas, esquistos bandeados, micasitas cuarcíferas y felsitas calcosilicáticas, éstas últimas se extienden desde el centro oriental de la Sierra de Ancasti.

Está caracterizado por metamorfitas y migmatitas con una edad de metamorfismo Ordovicica, que alojan una serie de granitoides calcoalcalinos. La composición de estos intrusivos varia de gabros tholeiticos, a tonalitas y granodioritas asociadas a subducción, su edad está estipulada Cámbrica a Ordovícica medio, culmina con granitos postcolisionales de edad Ordovicico Superior a Devonica basal.
La estructura de las Sierras Pampeanas ha sido caracterizada por [2]González Bonorino 1950, quien las consideró un sistema de montañas en bloque, limitadas por fallas inversas de alto ángulo, son cordones orientados en dirección NNO-SSW con alta pendiente hacia el Oeste y suave hacia el Este.

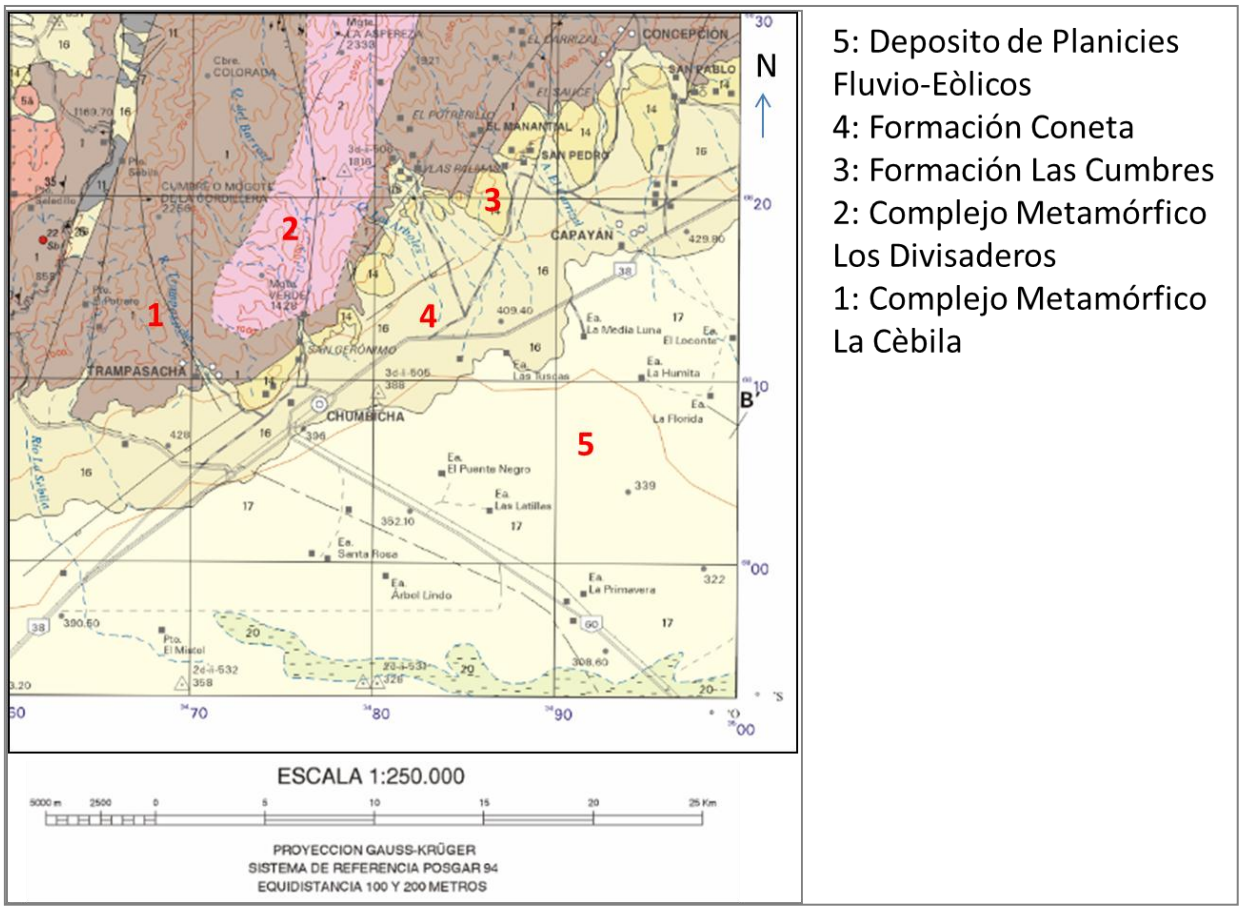


Figura 2. Mapa Geológico de la cuenca baja del Rio San Jerónimo, Chumbicha.

METODOLOGÍA

Para el análisis morfométrico se utilizó el software free Google Earth, Global Mapper 11 y autocad. los cálculos de los parámetros se realizaron a partir de una imagen satelital QuickBird de resolución 60x60 del terreno-ETISIG Catamarca. En el software Google Earth se delimitaron cuencas, red de drenaje, estructuras etc.; se exportó el archivo .kmz al software Global Mapper 11, se realizaron todas las mediciones pertinentes para obtener los parámetros de formas y tipos de cuencas, perfiles altimétricos y topográficos para obtener los relieves de la cuenca. Se exportó el archivo .dwg a AUTOCAD para análisis y jerarquización de la red. Del análisis morfométrico se obtuvieron los valores o datos cuantitativos de la cuenca.

Morfometria de la Cuenca

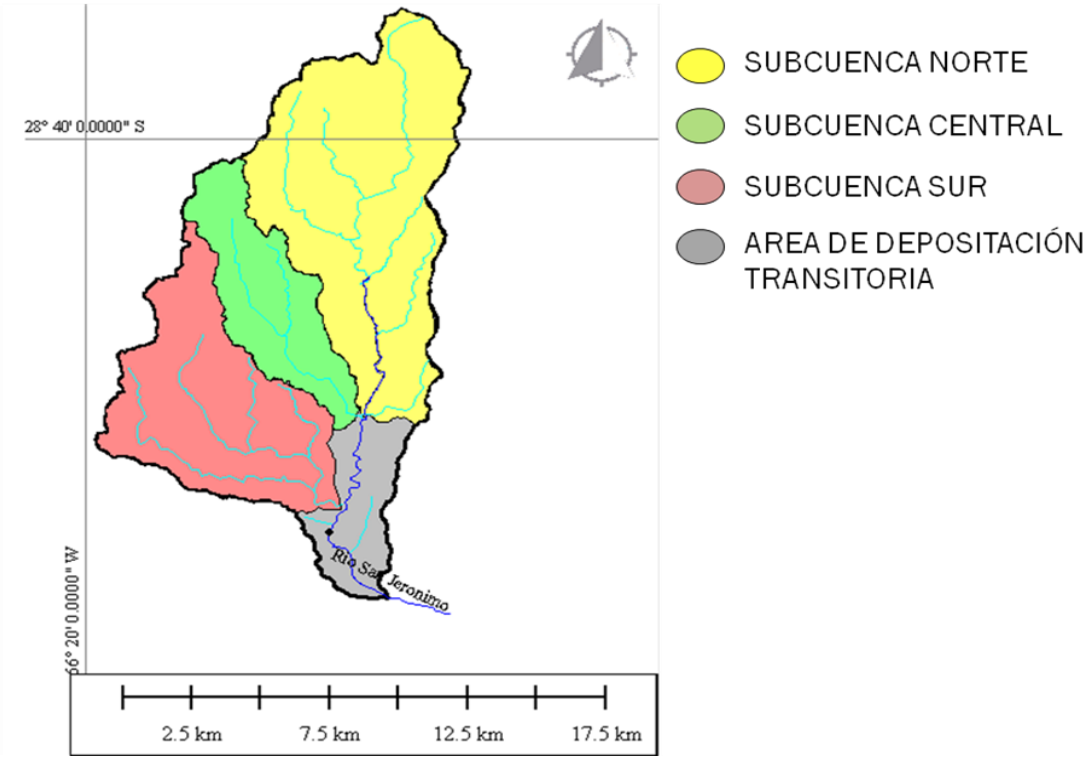


Figura 3. Delimitación de las subcuencas del Rio San jerónimo.

A través de la confección del mapa hidrológico de la cuenca del Rio San Jerónimo, se delimitaron 3 subcuencas, las que se denominaron según su ubicación en *Subcuenca Norte*, *Subcuenca Central*, *Subcuenca Sur* y un área de depositación transitoria en el interior de la cuenca, que será el canal colector de estos afluentes y el primero en recibir los aportes y consecuencias en épocas de lluvias extraordinarias.

El área de depositación transitoria puede ser considerada como una zona estratégica de monitoreo y control de la cuenca.

Parámetros generales de una cuenca:

Constituyen la información mínima necesaria para conocer para inferir la naturaleza y comportamiento de una cuenca, se analizan los siguientes parámetros: área, longitud, perímetro, ancho y desnivel altitudinal.

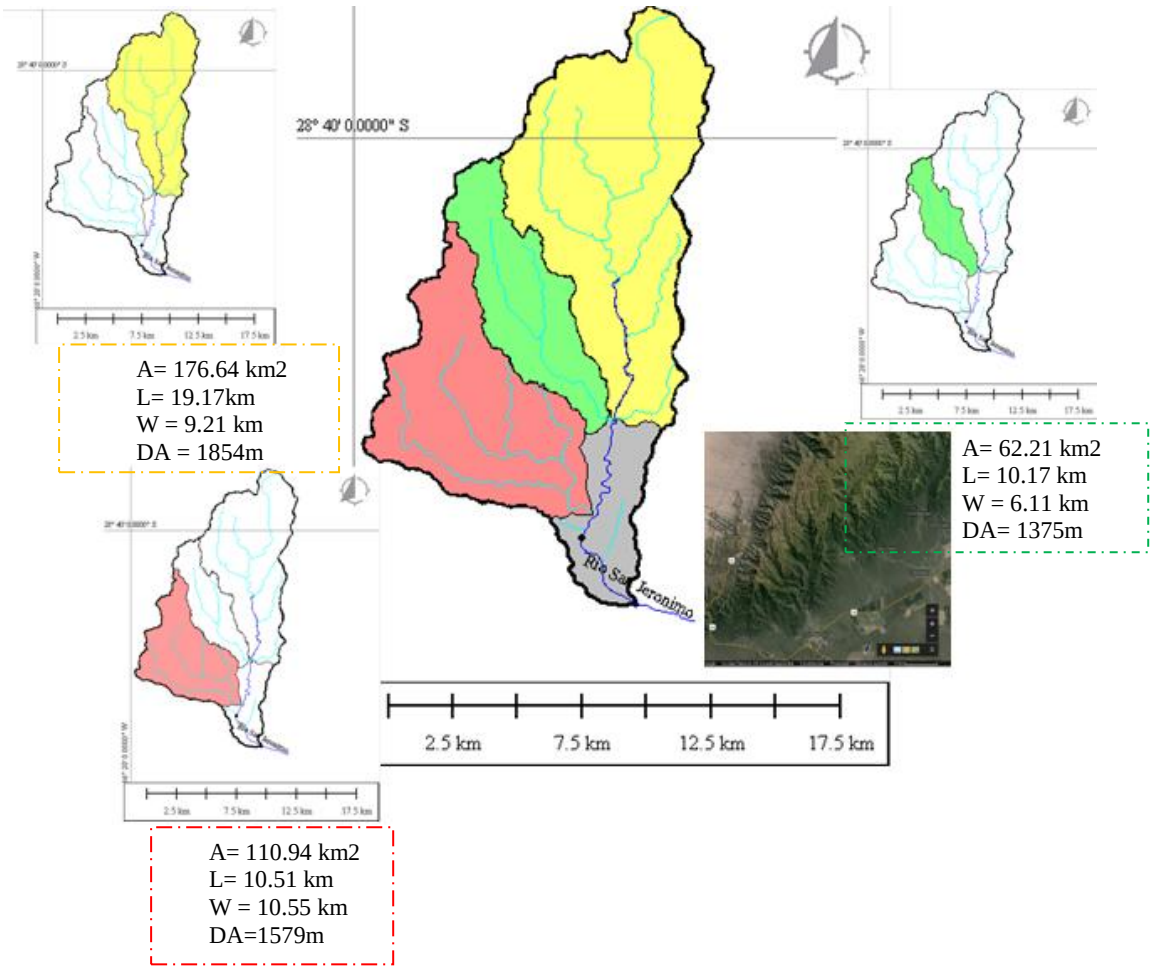


Figura 4. Parámetros generales de la subcuenca

Con el análisis de los parámetros generales de las subcuencas se determinó que: la subcuenca norte cubre un área de 176.64 Km^2, la subcuenca centro muestra un área de 62.21y el área de la subcuenca sur es de 110.94; de lo anterior se destaca que la cuenca norte es la más grande con respecto a las demás subcuencas, considerando que el área el parámetro más importante en función de la cual se determinan todos los parámetros del análisis morfométrico, es importante analizarla meticulosamente y será más precisa para detectar las crecientes en épocas de intensas lluvias, ya que los caudales van a crecer a medida que aumente el área.

Parámetros que caracterizan la forma de la cuenca

La forma de una cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico (cuencas con la misma área pero de diferentes formas presentan diferentes respuestas hidrológicas – hidrogramas diferentes por tanto- ante una lámina precipitada de igual magnitud y desarrollo), de ahí que algunos parámetros traten de cuantificar las características morfológicas por medio de índices o coeficientes.

FACTOR DE FORMA DE HORTON Kr = A/L^2

Kr = 0.58

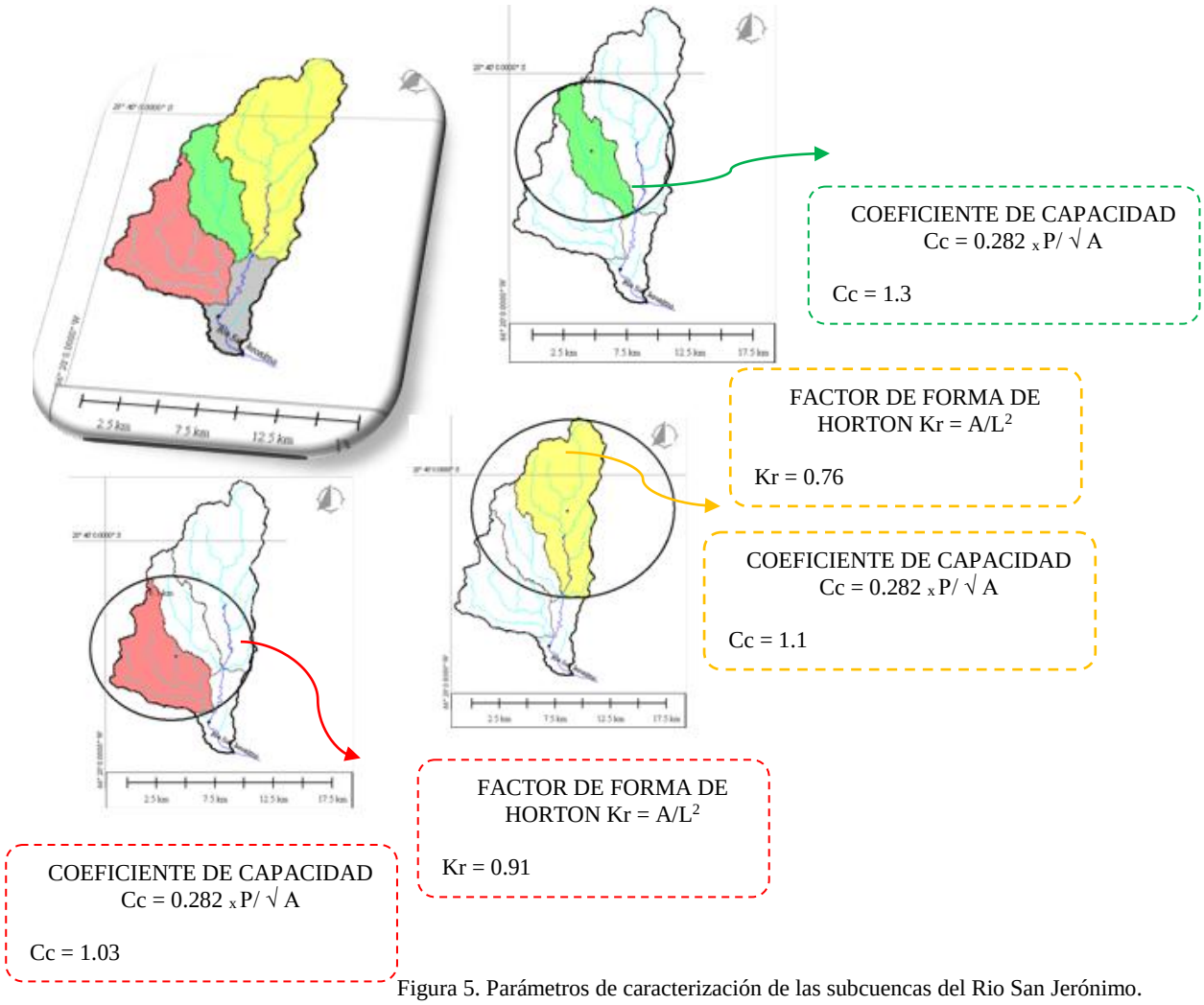


Figura 5. Parámetros de caracterización de las subcuencas del Rio San Jerónimo.

Con el cálculo del *coeficiente de capacidad* se determina que tan próxima a una forma circular es la cuenca, esto implica estimar la capacidad de captación de agua durante las precipitaciones.
Si el coeficiente de capacidad = 1 la cuenca es redonda y tiene la máxima capacidad de captación de Agua superficial, valora mayores o menores que indican menor capacidad de captación de agua. De lo expuesto se desprende que las subcuencas norte y sur tienen un coeficiente de compacidad que lo clasifica como próximo a redondeada, en tanto que la subcuenca central se la clasifica como redondeada a oblada indicando una distorsión en su forma.

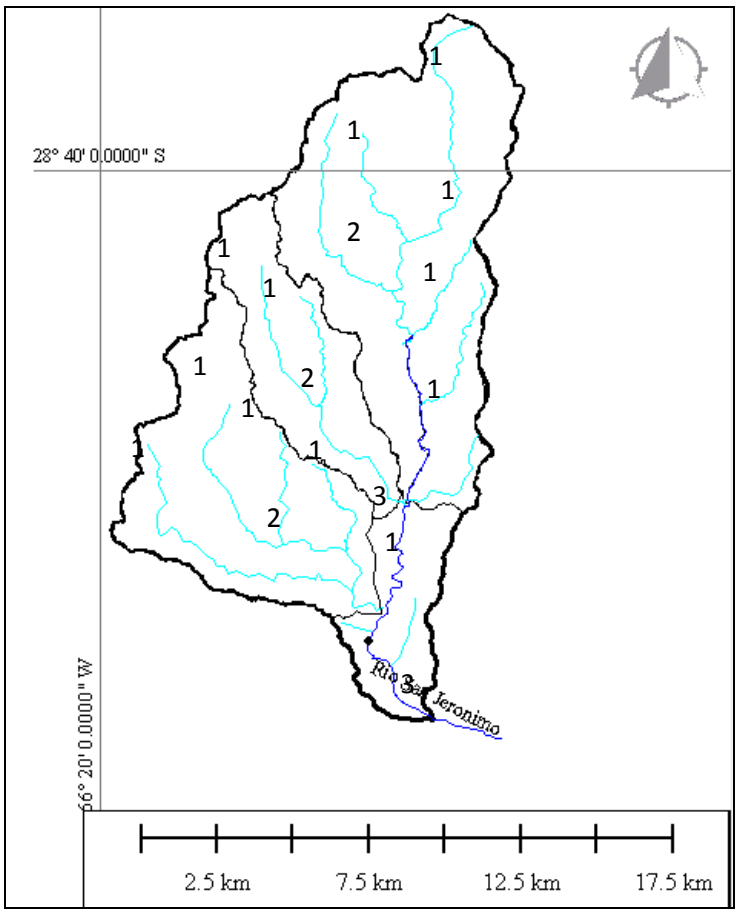
El *factor de forma de Horton* permite medir que tan alargada es la cuenca. Los valores obtenidos nos permiten corroborar que la subcuenca central, cuyo valor es menor, es la más alargada. Las subcuencas norte y sur al tener valores más elevados nos indica que su forma es más próxima a una circularidad.

Los resultados obtenidos a partir del coeficiente de compacidad y el factor de forma de Horton nos permite determinar que la subcuenca norte, al ser la mas redondeadas a diferencia de las demás, permite captar una mayor recepción de precipitación, lo que será mas propensa a crecidas de los afluentes y a una mayor erosión de laderas y talweg de los cauces.

Caracterización de la red de canales.

La *Densidad de drenaje* expresa el diseño y la concentración de afluentes que drenan la cuenca, Se calcula efectuando el cociente entre la longitud total de las corrientes de la cuenca y el área total de la misma.

Jerarquización de red de drenaje de Horton



DENSIDAD DE DRENAJE
Dd = ∑L / A

Dd = 0.25

DENSIDAD DE DRENAJE
Dd = ∑L / A

Dd = 0.23

DENSIDAD DE DRENAJE
Dd = ∑L / A

Dd = 0.26Km

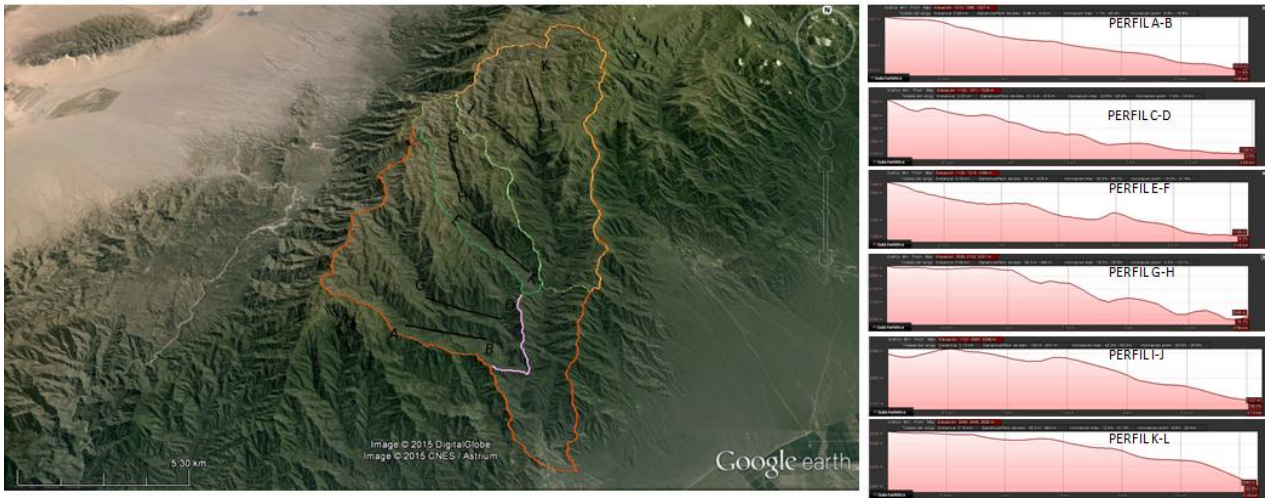
Figura 6. Análisis de jerarquización de Horton de la cuenca del Rio San Jerónimo.

La jerarquización de la cuenca del Rio San Jerónimo es del orden 3, si bien es un análisis subjetivo, nos permite deducir magnitud y la extensión de la red de drenaje de esta cuenca.
El rio San Jerónimo recibe principalmente una jerarquía de la subcuenca norte y sur, la subcuenca central al no tener una extensa área, los aportes en la jerarquía de esta no es primordial.
La densidad de drenaje de las distintas subcuencas son muy similares, lo que nos indica que la red de drenaje al tener valores bajos se debe al curso del agua por las rocas del basamento, que junto con la combinación del factor clima se determina un diseño de drenaje dendrítico.
El estudio conjunto de la jerarquización de Horton y la densidad de drenaje podemos inferir las áreas de mayor vulnerabilidad de la cuenca, mostrando una mayor densidad del drenaje en la subcuenca norte, que es donde actúan las mayores precipitaciones, corroboradas por la mayor erosión que se determina con la jerarquía que presenta la cabecera de esta cuenca.

Parámetros que caracterizan el relieve de la cuenca

Perfil altimétrico

El perfil altimétrico es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del río principal.
Con base en la forma del perfil altimétrico del río, se pueden inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión de la hidrógrafía, o sea, la variación del caudal con el tiempo.



Figuta 7. Perfiles altimétricos para la determinación de pendientes.

A los perfiles altimétricos se los obtuvieron utilizando la herramienta de diseño grafico Google Earth, donde se trazaron los perfiles de 3 Km aproximadamente, con el fin de mostrar el cambio de las pendientes en los diversos tramos de los afluentes principales de cada subcuenca, esos tramos han sido seleccionados considerando una cierta homogeneidad en cada uno.

La subcuenca norte presenta las pendientes más elevadas, sus porcentajes varían entre 20 – 25%, considerando que a mayor pendiente, mayor es la erosión y la carga del material de basamento, en esta subcuenca se podría suponer un incremento en la energía del cauce lo que se traduce en una mayor proporción de transporte de material.

La subcuenca central tiene las menores pendientes con porcentajes de 12 – 18%. Su relación con la forma permite deducir que es una zona de menor vulnerabilidad, aunque presenten una densidad de drenaje más elevada con respecto a las otras subcuencas, su menor pendiente disminuye los procesos de erosión y de remoción en masa.

CONCLUSIONES

El análisis morfométrico nos permite caracterizar las distintas subcuencas y determinar las áreas de vulnerabilidad para la población que se encuentra asentada sobre el abanico aluvial que se forma en la desembocadura de la cuenca del Rio San Jerónimo.

La subcuenca norte es la que presenta la mayor superficie con los mayores desniveles y pendientes, es la zona que capta mas volumen de agua de las precipitaciones, generando un incremento en los procesos de erosión sobre las rocas metamórficas que afloran en el lugar y sobre los depósitos c Cuaternarios que yacen sobre ellas.

Frente a una situación climática de extremas precipitaciones, la cuenca recibirá los mayores aportes de la subcuenca norte, y tendrá protagonismo el proceso torrencial, por lo que cabe pensar que será la responsable de modificar el modelado del relieve en la cuenca baja y piedemonte.

Por lo mencionado anteriormente podríamos hipotetizar que esta subcuenca representa la zona de mayor vulnerabilidad y tendrá mayor incidencia en los posibles procesos de remoción en masa que se podrían generar en la cuenca.

La integración de los parámetros morfométricos de una cuenca es un aporte importante para la consolidación y diseño del ordenamiento territorial de la localidad de Chumbicha. Además constituye la

organización de las comunidades y sus relaciones con los factores de forma, climáticos y dinámica de la red de drenaje.

REFERENCIAS

[1] STELNER, A., 1871, 1872 Y 1873 Comunicaciones al profesor H.B. Geinitz. Neues Jahbuch Fur Mineralogie, Geologie und Palaontologie, Jahrgang 1972: 193 – 198 y 630 – 636, Stuttgart 1872, e Ibidem 1873: 726 – 746, 1873. Traducido por R. Kittl, 1966 en Academia Nacional de Ciencias, Boletin 45: 115 – 150, Buenos Aires.

[2] GONZÁLEZ BONORINO, F. 1950a. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 5(3): 81-110. Buenos Aires.

[3] ATLAS CATAMARCA (2006), - Departamento de Capayan – Localidad de Chumbicha.

[4] Chow, V., Maidmen, D., y Mays, L. 1994. Hidrologia aplicada. Mc.Graw Hill. Santa Fe de Bogota. 584.p.

[5] González Bonorino, F. 1978. Descripción geológica de la Hoja 14f, San Fernando del Valle de Catamarca, Prov. de Catamarca y Tucumán. Boletín del Servicio Geológico Nacional 160: 85 p. Buenos Aires.

[6] Horton, R.E., 1945 Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative monitoring. Bull.Geol.Soc.Am., 56:275–370.

[7] Ruiz, D Y Stopp, P 1978. The river basin. An Introduction to the study of hydrology. Cambridge University Press. Londres – Inglaterra. 120p.

[8] Strahler A. V. (1952): Hypsometry analysis of erosional topography. Bull, Geol. Soc. Am. Vol. 63. p.p. 923-938.

[9] INSTITUTO DE GEOLOGIA Y RECURSOS MINERALES,- SEGEMAR. Hoja Geológica 2966-1 Aimogasta

BIOMONITOREO CON LÍQUENES: ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN *IN VIVO* DE METALES PESADOS MEDIANTE MICROPIXE

de la Fournière E.M.[a,b], Papú O.[c], Cañas M.S.[d], Vega N.A[a,b] y Debray M.E.[a,b]

[a]*Gerencia Investigación y Aplicaciones, CNEA, ARGENTINA.*
[b]*Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Gral. San Martín, ARGENTINA.*
[c]*International Center for Earth Sciences-Comisión Nacional de Energía Atómica (ICES-CNEA).*
[d]*Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca.*

e-mail: edlf@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

A partir de muestras del líquen Parmotrema austrosinense transplantado y utilizado como biomonitor atmosférico del proceso de recuperación del área denominada Sitios Malargüe (SM) afectada por la minería de uranio y ubicado estratégicamente y regularmente desde el sitio de recuperación hacia la ciudad de Malargüe (Mendoza), se buscó detectar y mapear la distribución in vivo de uranio y otros elementos que pudieran provenir de las colas de tratamiento de mineral de uranio. Se utilizó la técnica micro-PIXE que permite realizar mapas bidimensionales de la distribución multielemental (Z > 11) en una muestra, con precisión micrométrica. Se trabajó con la línea del microhaz de iones pesados del acelerador Tandar utilizando O^{5+} de 50 MeV como proyectil. Dado que las muestras se irradiaron en condiciones de alto vacío, fueron previamente deshidratadas (liofilizadas). Con la finalidad de no alterar la distribución in vivo, las muestras a irradiar fueron inmediatamente congeladas y cortadas mediante un crio-micrótomo a -20℃ evitando la migración de iones (crio-fijación). Los resultados preliminares arrojan que no habría diferencias significativas entre la composición elemental de las muestras analizadas y el blanco. Es de destacar que para este primer período de muestreo, correspondiente a otoño-invierno de 2014, la concentración de aerosoles, de variación estacional, es mínima según un trabajo previo realizado por nuestro grupo de PIXE. Se encaró un segundo muestreo sobre verano de 2015 y a partir de septiembre se empezó a monitorear los aerosoles de la ciudad discriminando entre PM 2,5 y PM 10 usando muestreador dicotómico Andersen-Graseby 240 instalado en el Planetario (centro de Malargüe) con el fin de complementar lo obtenido con los líquenes.

Palabras Clave: Líquenes, biomonitoreo, uranio, minería, microPIXE

INTRODUCCIÓN

El uranio está presente en el granito y en otros depósitos minerales[1]. En algunas aguas subterráneas, los niveles de uranio alcanzan 50 $mg.L^{-1}$[2]. El nivel guía para agua de bebida fijado por la OMS es de 15 $\mu g.L^{-1}$[3]. Su elevada toxicidad ocasiona nefritis y cáncer de huesos. Además, existe el riesgo radiológico que puede derivarse de procesos de actividad nuclear.

El Proyecto de Restitución Ambiental de la Minería del Uranio (PRAMU), creado en el año 2000, cuyo primer objetivo fue la restitución del Sitio Malargüe (SM), Mendoza, ya cuenta con un área de encapsulado y otra de parquización. Monitorear la calidad del aire en la zona es fundamental.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Estudio de biomonitoreo

Como biomonitor se empleó el liquen *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale (ver Figura 1), que es una especie que ha sido utilizada previamente en estudios de calidad de aire mediante trasplante [4,5]. Para ello, se colectó talos en un área poco antropizada, se acondicionaron convenientemente y se trasplantaron en bolsa sobre postes a distintos sitios de muestreo sobre una transecta desde el SM hacia la ciudad. Asimismo, se trasplantaron bolsas liquénicas a un sitio alejado del sitio de recuperación que sirvió de control para el monitoreo. El período de exposición fue de 3 meses y el monitoreo tuvo lugar sobre 2 períodos (invierno de 2014 y verano de 2015).



Figura 1. Parmotrema austrosinense.

Análisis por Emisión de Rayos X Inducida por Partículas

El Laboratorio Tandar dispone de dos líneas experimentales para el análisis multielemental:
1) macro-PIXE: Se ha utilizado hasta el presente con haces que tienen típicamente un sección transversal milimétrica y que explotan las ventajas comparativas de los haces de iones pesados frente a los haces de protones utilizados tradicionalmente. Dispone de dos detectores de Rayos-X dispersivos en energía.
2) Micro-haz de iones Pesados (MiP) ó Microscopio Nuclear. El MiP constituye un instrumento de características únicas en el país, pues puede proveer haces de iones pesados de dimensiones sub/micrométricas acelerados hasta decenas de MeV de energía. Esto se logra con una óptica iónica y colimación extremadamente precisas. Una bobina de barrido permite desplazar el haz con alta precisión y detenerse en zonas bien definidas, dando lugar a regiones irradiadas bien delimitadas. Esta capacidad permite realizar mapas bidimensionales de la distribución elemental en la muestra y, nos brinda una oportunidad de innovación e investigación ya que aumenta considerablemente las capacidades analíticas, abriendo perspectivas completamente nuevas y ampliando enormemente el rango de futuras aplicaciones. En este caso, se analizaron cortes histológicos de *P. austrosinense*.
Algunos de los trabajos realizados con macro y micro-PIXE por el grupo se enumeran en las referencias [6-15].

Preparación de muestras y adquisición de datos

Dado que las muestras deben irradiarse en condiciones de alto vacío, fueron previamente deshidratadas. Para esto, las muestras a irradiar fueron inmediatamente congeladas y cortadas mediante un crio-micrótomo a temperaturas de aproximadamente -20ºC para evitar la migración de iones, lo cual puede alterar la distribución *in vivo*.
Teniendo en cuenta que los iones con MeV de energía penetran en la materia biológica decenas de micrones sin sufrir alteraciones en su recorrido, se utilizaron cortes de ~10 µm de espesor. Estos espesores, además, permiten alcanzar la óptima emisión de rayos-X. Los cortes fueron transferidos a soportes de 4 µm de polipropileno montados en los marcos de irradiación. Posteriormente fueron sometidos a un proceso de liofilización (sin procesamiento ulterior) y, finalmente, se irradiaron con el microhaz. Para cada corte, se seccionó un "doble" contiguo. Este fue teñido para obtener una imagen óptica "tan cercana como sea posible" a la imagen óptica de la sección liofilizada, para distinguir detalles histológicos que fueron correlacionados con los mapas rayos-X de la distribución elemental. Los espectros de rayos-X se analizan con el programa WINQXAS [16] (adaptado con nuestra base de datos para iones pesados).

RESULTADOS

Primer muestreo

En la Figura 2, se observan los mapas de rayos X de la muestra Planetario (ubicada en un lugar sensible de la ciudad) correspondiente a la distribución de los elementos en el corte transversal del liquen. El primer mapa corresponde al Ca que nos permiten delimitar la estructura del corte de manera inequívoca: el líquen está compuesto por una médula (en la imagen, píxeles celestes, rojos y amarillos) rodeada por dos capas externas (píxeles azules).

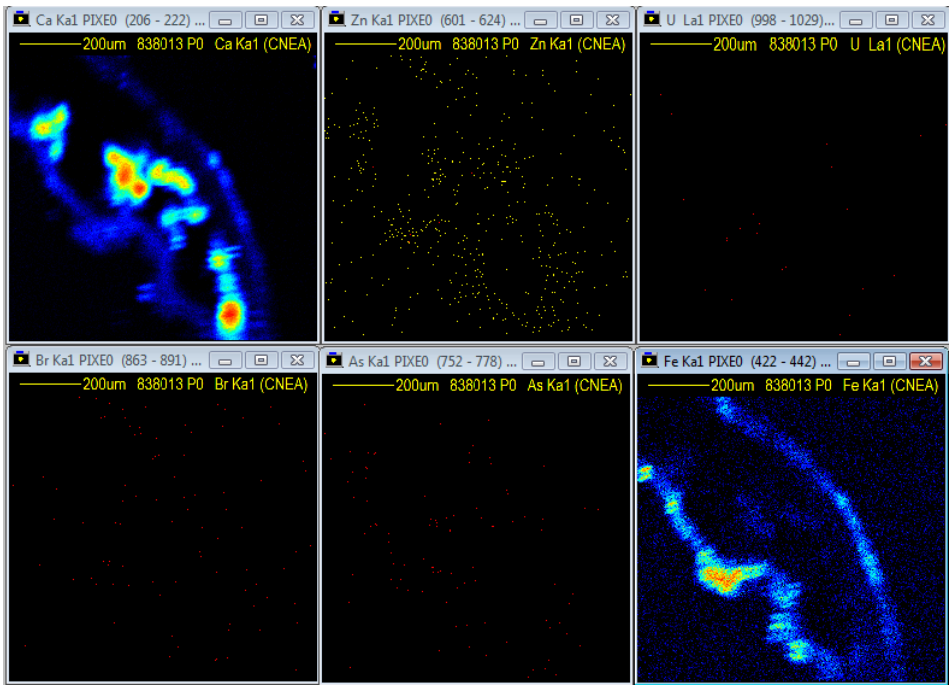


Figura 2. Mapa 2D de rayos X correspondientes a la distribución *in vivo* de Ca, U, Zn, Br, Fe y As en corte transversal de *P. austrosinense*. Muestra Planetario. Proyectil: $^{16}O^{5+}$ 50 MeV. Area de barrido: 500×500 µm^2. Diámetro del haz: 2µm.

El Fe es el único elemento que se localiza mayoritariamente al exterior de la médula. El U se encuentra por debajo del límite de detección (2 µg.g^{-1}). Se detectan As y Br que no se pueden mapear por falta de estadística.
Por cada mapa de distribución, el programa de adquisición elabora matrices de 256×256 datos (cuentas de rayos X). Se presentan parte de las matrices correspondientes a Ca y U, respectivamente (ver Figura 3). En la matriz de Ca, se registran algunos valores muy bajos (1 o 0) que corresponden a una región donde sólo hay film soporte y evidencian su alta pureza. Los valores más altos corresponden a la médula. Por otro lado, en la matriz de U, nótese que prácticamente no se registran cuentas de U.

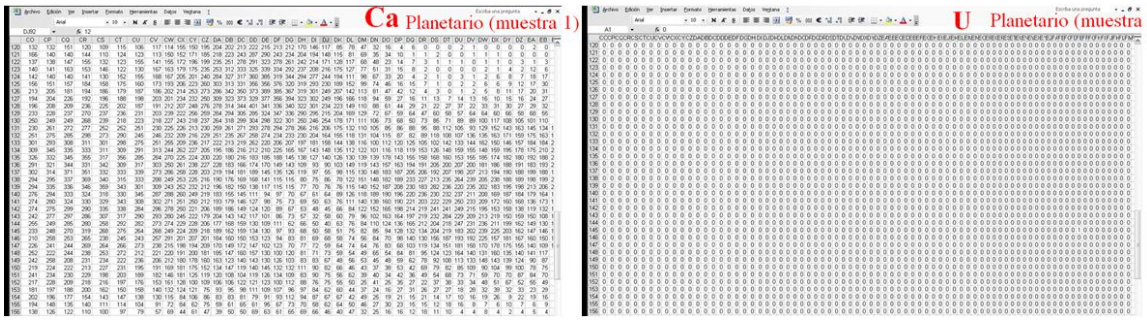


Figura 3. Matrices 256×256 asociadas a los mapas de distribución de Ca y U correspondientes a los datos de la Fig. 2.

Segundo muestreo

Las muestras de líquenes correspondientes al monitoreo sobre el período verano de 2015 también presentaron un contenido de U inferior al límite de detección de la técnica. Aún la muestra ubicada dentro del predio del PRAMU no concentró U (ver Figura 4).

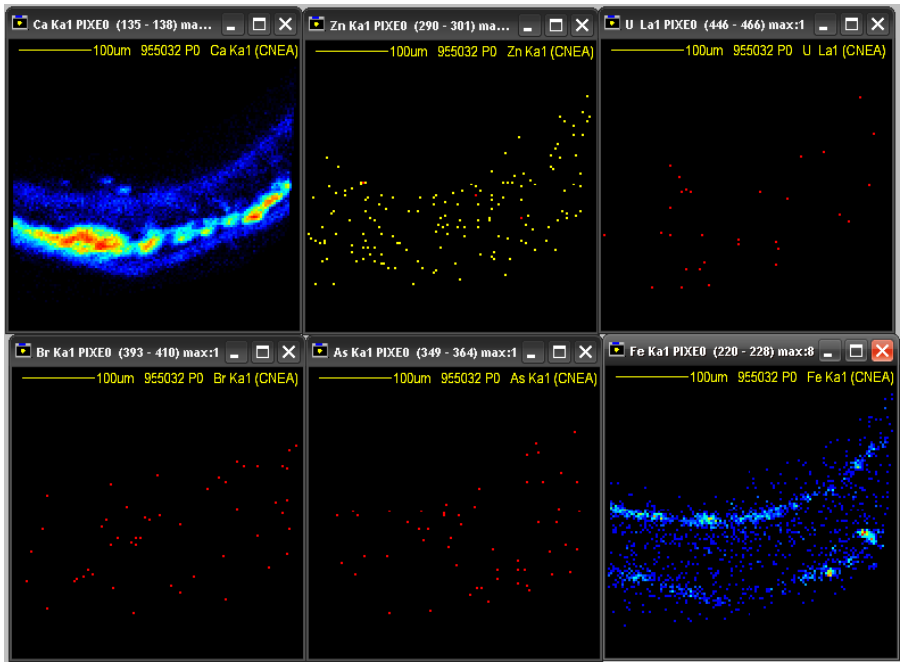


Figura 4. Mapa de distribución de rayos X de Ca, U, Zn, Br, Fe y As en corte transversal de *P. austrosinense*. Muestra Pramu. Proyectil: $^{16}O^{5+}$ 50MeV.
Area de barrido: 300×300 µm^2. Diámetro del haz: 2 µm.

Nuevamente la distribución *in vivo* de Ca marca los límites del corte histológico y se concentra en la médula. Se detecta también As y Br.

Controles

Como se dijera anteriormente, se usaron líquenes controles con los cuales contrastar las distribuciones elementales y detecciones obtenidas para las muestras ubicadas en Malargüe.

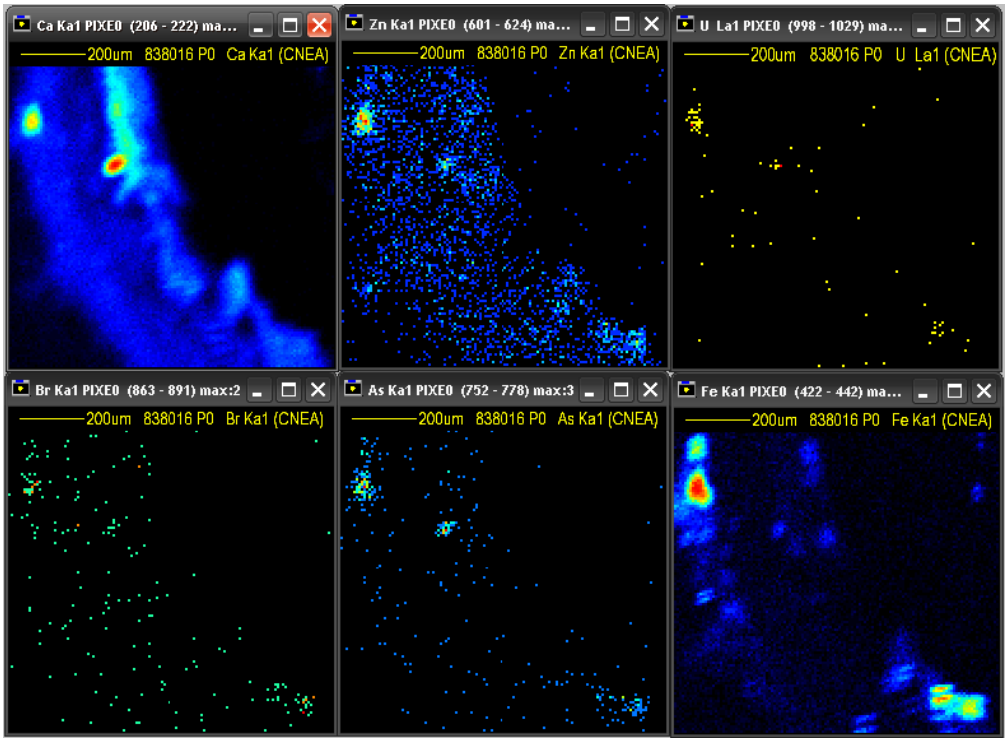


Figura 5. Mapa 2D de rayos X correspondientes a la distribución *in vivo* de Ca, U, Zn, Br, Fe y As en corte transversal de *P. austrosinense*. Control. Proyectil: $^{16}O^{5+}$ 50 MeV. Area de barrido: 500×500 µm^2. Diámetro del haz: 2µm.

La distribución elemental de Ca (ver Figura 5) no sigue un patrón tan marcado (no se distingue la médula) como en los casos anteriores. En el mapa de U, sólo se observa fondo. El hallazgo más importante es Br y As cuyas distribuciones elementales se ajustan al corte histológico.

DISCUSIÓN

Al comparar versus el control, se evidencia un mayor contenido de Ca en los líquenes expuestos en Malargüe. La acumulación se centra a nivel de la médula. El origen del Ca extra podría relacionarse con la presencia de una yesería en la zona.
El contenido de U en los líquenes del monitoreo se encuentra por debajo del límite de detección.
El hallazgo de Br en el control se originaría por el uso de CH_3Br como pesticida en plantaciones de frutillas en la zona de Catamarca de donde es originario *P. austrosinense*. El As es de origen geológico.

CONCLUSIONES

No se observan diferencias significativas entre la composición de los líquenes biomonitores y el control en cuanto a U. No se halló uranio (límite de detección). Habría que contrastar los datos con lo que arrojen las mediciones de aerosoles.

Habría que repensar la estrategia de monitoreo buscando ejemplares de *P. austrosinense* libres de Br dado que la presencia del halógeno podría alterar el metabolismo del liquen.

REFERENCIAS

[1] Ragnarsdottir, K.V., Charlet, L., 2000. Uranium behaviour in natural environments. In: Environmental Mineralogy: Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminate Land and Waste Management. The Mineralogical Society of Great Britain & Ireland.

[2] Noubactep, C. et al., 2006. Mechanism of uranium removal from the aqueous solution by elemental iron. J. Hazard. Mater. B 132, 202-212.

[3] Guidelines for drinking-water quality, 3rd. ed., incorporating 1st. addendum. Vol. 1, Recommendations. World Health Organization, 2006.

[4] Palomeque, L.I., Mohaded Aybar, C.B., Ocampo, A.I., Severini, P., Cañas, M.S. 2006. Evaluación de la calidad de aire en un sector del departamento Belén (Catamarca) mediante el empleo de *Parmotrema austrosinense* como biomonitora. En: *Investigaciones Docentes en Ingeniería*. Editorial Sarquís. Vol. 1. Pág. 189-192.

[5] Mohaded Aybar C.B., Jasan R.C., Ocampo A.I., Moyano R.G., Coronel R.J., Plá R.R. & Cañas M.S. 2012. Evaluación de la calidad del aire a través de la composición multielemental del liquen *Parmotrema austrosinense* transplantado a la zona minera del oeste de Catamarca (Argentina). Actas del Séptimo Encuentro del "Internacional Center For Earth Sciences" E-ICES 7, Pág. 215-221.

[6] Watt, F., 1995. The High-Energy Ion Microprobe, Capitulo 3, Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry, Vol. 133, John Wiley and Sons.

[7] Caridi, A. et al., 1989. Determination of Atmospheric Lead Pollution of Automotive Origin, A. Caridi, A.J. Kreiner. Atmos Environ *23, 2855-2856.*

[8] Ozafrán, M.J. et al, 1993. PIXE Analysis of Heavy Water from a Nuclear Power Plant. *Nucl.Instr.and Methods B 74 542.*

[9] Debray, M.E. et al., 1997. Evidence for enhanced aluminum concentration in brain tissue from Alzheimer's disease patients using heavy ion PIXE, *Applications of Accelerators in Research and Industry, American Institute of Physics Press(New York)567-570.*,PIXE experimental investigations on samples of Alzheimer's disease, *XI International Conference: Alzheimer's Disease and Related Disorders, Buenos Aires, 12-15 de Septiembre de 1995.*

[10] Fonovich, T. et al., 2000. Acumulación de Zn en ovarios de sapo Bufo arenarum. Efecto sobre el metabolismo de carbohidratos. Braz J Toxicol 13, 55-62.

[11] Naab, T. et al., 2001. Metabolic Alterations Without Metal Accumulation in the Ovary of Adult *Bufo arenarum* Females, Observed After Long-Term Exposure to Zn^{2+}, Followed by Toxicity to Embryos. Arch Environ Contam Toxicol, 41(2), 201.

[12] Schuff, J.A. et al. 2002. Relative biological effectiveness measurements of low energy proton and lithium beams on tumor cells. Nuc. Instrum and Meth B 187, 345.

[13] Stoliar, P. et al., 2004. Microdistribution of Prospective BNCT-Compound CuTCPH in Tissue Sections with a Heavy Ion Microbeam. Applied Radiation and Isotopes 61, 771.

[14] Muscio, J. et al., 2007. Radiographic Technique for Densitometric Studies Using Heavy Ion Microbeams, VII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, AIP Conference Proceedings, 947. 491.

[15] Murruni, L.G., 2009. Concentrations and elemental composition of particulate matter in the Buenos Aires underground system. *Atmos Environ 43, 4577*

[16] www.iaea.or.at/programmes/ripc/.../winqxas.htm

EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y PREVISIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS DEL ÁREA PEDEMONTANA DE LA QUEBRADA Y DIQUE LOS SAUCES - LA RIOJA, ARGENTINA

Laura Sonia del V. Avila[a], Adriana E. Niz[b]

[a]Cátedra : Geomorfología - Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Comahue, Neuquén (Argentina)
[b]Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental-IMCoDeG- Fac. de Tecnologìa y Cs Aplicadas Universidad Nacional de Catamarca. Maximio Victoria 55. 4700 Catamarca

e-mail: lauraavila85@hotmail.com

RESUMEN

El área de estudio, barrio La Quebrada, ingreso al dique Los Sauces, es un valle tectónico, donde reside una comunidad estable, y temporal (veraneo), es corredor turístico del Valle de Sanagasta y La Costa Riojana, lo que implica una importante actividad antrópica que potencia el riesgo de deslizamientos de laderas, agravados, lluvias extraordinarias y sismisidad regional.
Es una región pobremente estudiada en riesgo geológico, por ello es importante la detección, definición y valoración de áreas sujetas a riesgo geológico y antrópico, actuales y potenciales, para la confección de cartas de vulnerabilidad y riesgo, necesarias para la planificación y toma de decisiones para el uso sostenible del territorio.
Se efectuó una geolocalización de las unidades litológicas en el área; las referencias fotográficas y puntos de control de altura, se tomaron en un vuelo en Trike, a través de la geolocalización de los puntos de GPS, para la elaboración de: modelo de elevación digital (DEM), cartografía Geológica, Geomorfológica, de orientación de laderas, de pendientes y de susceptibilidad frente al riesgo.
Se caracterizó el área, los procesos morfodinámicos que actúan en ella y su incidencia; acompañadas del análisis conceptual para dar el marco de referencia en el que se califica y clasifica cada aspecto contemplado.
En conclusión, los procesos más frecuentes en la quebrada y dique Los Sauces, son los deslizamientos gravitacionales en seco, los de mayor magnitud son las avalanchas de detritos en áreas de máxima pendiente de ladera. Las precipitaciones, erosión por escorrentía y acción antrópica, constituyen los factores desencadenantes de los eventos de remoción en masa observados.
La susceptibilidad al riesgo geológico de tipo remoción en masa cubre el 70% del área correspondiendo a zonas de alta a muy alta susceptibilidad, relacionadas a pendientes mayores a 25° y se circunscriben al área montana que limita la quebrada.

Palabras Clave: remoción en masa, actividad antrópica. Quebrada Rio Los Sauces, La Rioja

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de La Rioja y sus alrededores tanto en áreas pedemontanas como montanas, se observan evidencias de vulnerabilidad frente a la acción de diversos procesos morfodinámicos de orden natural, los cuales en la actualidad carecen de una investigación detallada.
Además el incremento constante de la intervención de la actividad humana, que se manifiesta por la ejecución de obras viales y asentamientos humanos, incrementan la vulnerabilidad propiciando potenciales áreas de riesgos, que podrían generar desastres naturales que afectarían a vidas y bienes.
Tal es el caso de los movimientos de remoción en masa de tipo seco o húmedo rápidos y lentos, como por ejemplo caída de detritos que perjudican a sectores urbanos, sea por cuencas laterales temporarias,

colapsos de suelos que producen daños a las obras de infraestructura y edilicias, como así también la erosión hídrica generalizada o de márgenes debido a la puesta en marcha de obras tanto viales como edilicias.
Estas situaciones, ponen de relevancia la incorrecta intervención que se ha realizado del medio natural y al mismo tiempo la falta de un adecuado conocimiento de sus características geológicas y geomorfológicas que indudablemente condicionan las distintas actividades que allí se desarrollan.
Todo ello ha motivado la ejecución del presente trabajo, en el cual se pone un particular énfasis en el reconocimiento y definición de clases o tipos litológicos, las condiciones y características de la geodinámica de superficie y el estudio de los aspectos morfodinámicos generadores de las situaciones de inestabilidad actual y/o potencial.

UBICACIÓN

La zona de estudio se sitúa entre la coordenadas 29º24’S 66º56’W límite SO- 29°22'S 67°0'O límite NO y 29º22’S 66º59’W límite NE 29°24'S - 66°55'O límite SE, en la ciudad capital de la provincia de La Rioja, situada en el noroeste del país, limita al noroeste con la república de Chile, al oeste con la provincia de San Juan, al sur con la provincia de San Luis, al este con la provincia de Córdoba y al norte con la provincia de Catamarca.
Con una superficie de 89.680 km² representa el 3,22% del territorio argentino. Su economía se sustenta a partir de la agricultura bajo riego artificial, con producción de vid y olivos principalmente; también ha crecido considerablemente el turismo en los últimos años, sobresaliendo el Parque Nacional Talampaya, como principal atractivo (ver Figura 1).

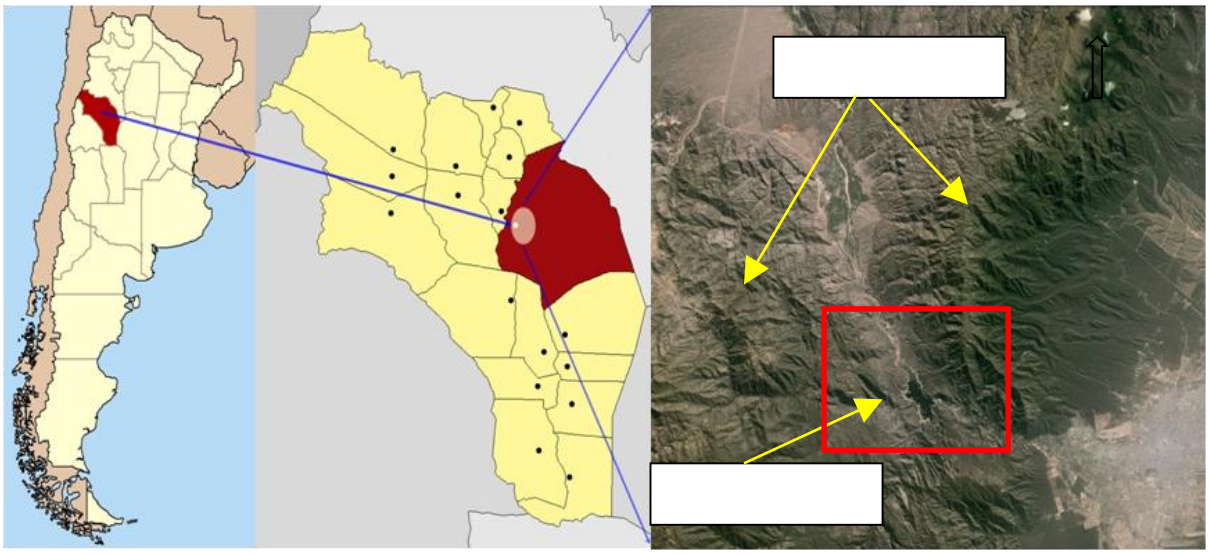


Figura 1. Croquis de ubicación.

METODOLOGÍA

El trabajo fue dividido en tres etapas. En la primera etapa se desarrollaron tareas de gabinete previas a la campaña; segunda etapa, trabajos de campo y tercera etapa procesamiento e interpretación de la información obtenida para la elaboración de la presente tesis. Las diferentes etapas se detallan a continuación.
Primera etapa: el trabajo de investigación previa consistió en el relevamiento de los antecedentes de la información geológica, geomorfológica y de estudios de susceptibilidad de riesgos geológicos de la zona, como así también, de los eventos de riesgo históricos de los últimos 22 años registrados en el área de La Quebrada y Dique Los Sauces.
Segunda etapa: el trabajo de campaña consistió en:

1.- Reconocimiento y relevamiento del área de la quebrada del Río Los Sauces y zonas aledañas al Dique Los Sauces, hasta la Formación Pollera de La Gitana al norte del dique. La actividad de campo se llevó a cabo entre Noviembre 2.013 a Enero 2.014, se realizó el control de campo pertinente de la cartografía confeccionada, la identificación, ubicación y posicionamiento geográfico de los principales sectores en donde ocurren los procesos de riesgos geológicos diferenciándolos entre eventos potenciales y activos, utilizando para ello el sistema Global Positional System (GPS).

2.- Se formalizó la geolocalización de las distintas unidades litológicas presentes en el área, cotejando la Hoja Geológica 2966-III (1.999) inédita, para complementar esa información como una contribución de la presente tesis, al describir las formaciones no registradas, ya que la Hoja Geológica aún se encuentra en construcción por el SEGEMAR, y solo se contó con un borrador digital.

3.- Para complementar las referencias fotográficas se efectuó un vuelo en Trike (avión ultraliviano), durante el cual se han tomado fotografías desde diversas alturas -100 a 300 metros- en las áreas de mayor interés, en algunos sectores se captaron imágenes entre 900 y 1660 metros, con el objetivo de corroborar la caracterización geomorfológica general y la relación entre las investigaciones realizadas y los resultados logrados en la presente investigación, tanto en los aspectos cartográficos como la descripción técnico-científica de los procesos de remoción en masa.

4.- Utilizando la cámara fotográfica digital PANASONIC modelo LUMIX con GPS incorporado, se tomaron puntos de control de altura, en sitios geográficos identificables en la cartografía, para la elaboración de: modelo de elevación digital (Digital Elevation Model-DEM), corroboración de coordenadas plano Geológico, plano Geomorfológico, plano de orientación de laderas y plano de pendientes en función de la susceptibilidad frente al riesgo.

Tercera etapa: para el procesamiento e interpretación de la información, se trabajó sobre los datos obtenidos y se volcaron los puntos de control sobre una base georeferenciada, utilizando el software ENVI (versión 4.2) que permite georreferenciar las imágenes, escala 1 a 1. Para el manejo de datos y la generación de la cartografía necesaria para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el software ArcGIS 10.1, se ha elaborado la cartografía que se describe a continuación: Plano Geológico (escala 1:125.000); plano Geomorfológico (escala 1:50.000); Plano de pendientes y de orientación de laderas según susceptibilidad de riesgo de remoción en masa (escala 1:50.000).

GEOLOGÍA Y ESTRUCTURA

La columna estratigráfica está parcialmente expuesta en el área de estudio. La superficie de mayor afloramiento en el área montana es el Basamento cristalino (Precámbrico-Paleozoico inferior), sigue en importancia rocas sedimentarias del Grupo Paganzo (Carbónico superior-Pérmico inferior), cuyos afloramientos se presentan en el faldeo oriental y occidental de la sierra de Velasco. Sedimentos del Cuaternario constituyen una extensa y potente cubierta sedimentaria en el área pedemontana.

Debido a que sólo se dispuso de un borrador de la Hoja Geológica 2966-III, de La Rioja - SEGEMAR [1], usado para el relevamiento de formaciones geológicas del área en estudio, se pudo comprobar la existencia de afloramientos de formaciones neopaleozoicas (Formación Libertad y Los Sauces) en sectores aledaños al dique Los Sauces, que no aparecen en la hoja mencionada, como así también la presencia de formaciones cuya edad geológica ha cambiado por los descubrimientos paleontológicos realizados en los últimos años, en particular éstas investigaciones fueron realizadas en la Formación Los Llanos por los investigadores del CRILAR-Conicet [2], lo cual se considera un aporte de la presente tesis.

La columna estratigráfica en el área de la quebrada y dique Los Sauces, se resume de la siguiente manera:

Basamento cristalino (Precámbrico - Paleozoico inferior)

En el sector occidental de la sierra de Velasco, integrado por un complejo granítico-metamórfico, constituidos por:

Formación Paimán *[3]:* constituida por rocas graníticas porfiroides y agrupa: granitos, granodioritas y tonalitas, junto con aplitas y pegmatitas y abarca varios pulsos intrusivos que van desde el Ordovícico al Carbonífero [1]. Los afloramientos granitoides de la Sierra de Velasco, están integrados por un importante sequito de plutones de diverso tamaño, caracteres y edades.

Formación La Cébila *[4]:* constituida por micacitas, cuarcitas y esquistos micáceos, atribuidas al Ordovícico inferior [5], que afloran en la ladera oriental de la sierra bordeando el camino de la quebrada hasta el dique Los Sauces.
En el aspecto regional, estas rocas con bajo grado de metamorfismo, pueden considerarse como relictos que han conservado las características de los sedimentos psamo-pelíticos depositados en la cuenca marina, durante el Precámbrico superior-Cámbrico basal y constituyen las rocas regionales en la cual intruyen los granitos paleozoicos.

Formación Antinaco *[3]:* constituida por orto-gneises y granitos gnéisicos porfiroides, con foliación milonítica que gradan a gneises miloníticos y protomilonitas, atribuida al Ordovícico superior-Devónico inferior [1], afloran en los márgenes de la cumbre del cerro de La Cruz a 1.600 m.s.n.m. Este plutón, que no presenta roca de caja, sino solo bloques dispersos con tamaños que no sobrepasan decenas de metros, está enlongado en dirección norte-sur.

Grupo Paganzo (Carbónico superior - Pérmico inferior)
Los afloramientos Neopaleozoicos se localizan alrededor del dique Los Sauces, constituyendo un importante depósito sedimentario ubicado en el margen norte de la cuenca Paganzo, que sobreyacen al Basamento cristalino en la margen oriental de la sierra de Velasco. La columna geológica es grano y estrato decreciente, con características distintivas litológicas y paleontológicas que permiten dividir los depósitos, de edad Carbonífera-Pérmica en tres formaciones, dos afloran en el margen oriental y occidental del dique Los Sauces, Formación Libertad y Formación Los Sauces, y la tercera aflora en el sector NE del mencionado dique, denominada como Formación Lagares.

Formación Libertad: constituida por bancos de conglomerados y areniscas de colores claros, gris verdosos y morados, entre los que se intercalan estratos arcillosos de color negro con restos de frondes, hojas, tallos, compresiones y moldes de semillas en su parte basal y superior que permiten ubicar esta unidad en el Carbonífero superior [6].

Formación Lagares*:* constituida por conglomerados, areniscas arcósicas, arcillitas y mantos carbonosos, atribuida al último piso del Grupo Paganzo, de edad Carbonífero superior. Un pequeño depósito aflora al NE del lago del dique Los Sauces.

Formación Los Sauces: constituida por areniscas, limolitas y en menor proporción por conglomerados, de color rojo ladrillo en general. Sus principales afloramientos se encuentran al NNO, NE y SSE del valle del dique Los Sauces, con relictos aislados en la región central. Los estudios palinológicos indican una edad Pérmico inferior [6].
En el sector conocido como la "Pollera de La Gitana" se puede observar:

a. material mega florístico, aunque es más escaso y presenta un regular estado de preservación en comparación con lo hallado en la Formación Libertad. Se observaron, en diferentes niveles, varias improntas de tallos correspondientes a articuladas de porte arborescente; y
b. en los niveles sedimentarios presentan predominancia de material fino macizo o con estratificación tabular, en donde se puede observar el rastro dejado por paleocorrientes en varias direcciones lo que indica que el paleoambiente de la Formación Los Sauces corresponde a un sistema de canales arenosos entrelazados que se desarrollaron en una planicie de inundación limo arenoso.

Formación Los Llanos (Cretácico superior)
En esta investigación se aporta mapa geológico con la representación de la Formación Los Llanos de edad Cretácica superior, compuesta por areniscas cuarzosas, con capas de yeso, concreciones calcáreas y silíceas, aflora en la parte nororiental de la sierra de Velasco.
En relación a su edad geológica tiene una larga historia de grandes controversias, ya que Bodenbender (1.911) asignó una edad cretácica a sedimentitas dispersas al sur de La Rioja, las denominó "Estratos de Los Llanos", unidades que luego corresponderían a la Formación Los Llanos. Posteriormente, fue considerada terciaria por otros autores, una idea que persistió hasta nuestros días [7]. No obstante, recientemente se publicó el hallazgo de fragmentos de huevos de dinosaurios en niveles de la Formación

Los Llanos, reconsiderando la idea original y retribuyéndole una edad cretácica tardía [8]. En el año 2.007 comenzaron intensos trabajos paleontológicos en el Parque Geológico Sanagasta y resultaron en el descubrimiento del primer sitio de nidificación de neosaurópodos asociado a un paleoambiente geotermal en niveles del Cretácico [2].
Los estudios aclararon aspectos sobre la reproducción de éstos dinosaurios, comportamientos coloniales, fidelidad al sitio –filo patria– y una relación reproductiva oportunista dependiente del paleoambiente [2]. Este descubrimiento y el hallazgo de una fauna fósil cretácica en afloramientos de la Formación Los Llanos [8], esclarecieron parcialmente la edad de estos sedimentos asociados a las Sierras Pampeanas.

Sedimentos Cuaternarios
Unidad conformada por sedimentos que rellenan el área pedemontana de la sierra de Velazco, constituidos por materiales de origen diverso y se diferencian en función de su posición topográfica en:

- Depósitos Aluviales: sedimentos aluviales y gravitacionales desde unos pocos metros de espesor hasta superar los 400 metros, compuestos por bloques, gravas, arenas y limos. Depósitos de grandes abanicos aluviales pedemontanos, compuestos por gravas, arenas y limos;
- Depósitos fanglomerádicos, compuestos por bloques, gravas y arenas;
- Depósitos loéssicos.

En base a los estudios realizados [9], *"*el área de estudio se ubica en la sierra de Velasco pertenece al sistema de las Sierras Pampeanas Noroccidentales [10]. El arco magmático de las Sierras Pampeanas Occidentales [11], se diferenciaría del correspondiente a las Sierras Pampeanas Orientales por su edad más joven, cámbrica superior hasta ordovícica media inclusive (515 y 460 Ma.), y se encuentra asociado con el proceso de la subducción activo en el área.
Este sistema de sierras forma un esquema estructural de levantamiento tectónico conjuntamente con la sierra de Famatina y está delimitado por fallas, tiene una disposición alargada en sentido predominantemente N - S, y deben su origen a la orogenia andina. La sierra de Velasco tiene en su margen oriental una prominente actividad neotectónica evidenciada a lo largo del piedemonte oriental por escarpas de falla que afectan a los depósitos cuaternarios y otros rasgos geomórficos asociados a la falla de La Rioja [12]. Esta falla inversa coincide con la región epicentral del terremoto del 28 de mayo de 2.002, con epicentro a 8 Km de profundidad" (ver Figura 2).

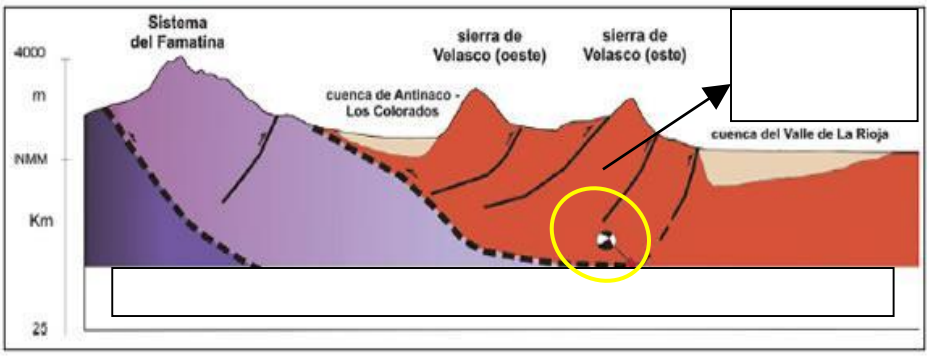


Figura 2. Esquema estructural con diferentes basamentos en las sierras de Velasco y Sistema de Famatina en el perfil este-oeste. En esta representación se esbozan las principales fallas que levantan los bloques de basamento para formar las sierras de Famatina y Velasco, las posibles zonas de sutura a ambos lados del Famatina y se dibujan las cuencas intermontanas reconocidas [9].

GEOMORFOLOGÍA

El área del Dique Los Sauces y La Quebrada, correspondientes a la zona de estudio de este trabajo, se insertan en el Valle Antinaco-Los Colorados que se extiende entre la sierra de Famatina al oeste, y la sierra de Velasco, al este. Se trata de una gran depresión tectónica que se encuentra recubierto por potentes depósitos de aluviones. El relieve se caracteriza por la presencia de zonas elevadas, correspondientes a la Sierra de Velasco, y las depresiones conformadas por los diversos valles que la

recorren. En el centro del área se ubica el dique Los Sauces, el que se comunica con la ciudad capital de La Rioja a través un valle tectónico que presenta laderas abruptas denominado La Quebrada.
Para el análisis geomorfológico se realizó la distinción de las unidades geomorfológicas presentes en el área montana y pedemontana de La Quebrada y Dique Los Sauces. Asumiendo que *"una unidad geomorfológica se caracteriza por su homogeneidad espacial y temporal, expresada por la presencia reiterada de elementos morfogenéticos endógenos y una similar historia geomórfica, constituyendo así una unidad básica de mapeo" [13].*
En esta fase se analizaron una serie de elementos primordiales tales como: topografía, drenaje, erosión, fenómenos de remoción en masa y aspectos antrópicos, tomando en consideración solamente los procesos geomorfológicos que individualmente y en conjunto, contribuyen a la estabilidad o inestabilidad de un sector.
El análisis de los deslizamientos y áreas de vulnerabilidad de riesgo por eventos de remoción en masa se concentran a lo largo del área de estudio, presentándose diferentes geoformas que nos permiten concluir que esta área es altamente vulnerable a los eventos de riesgos debidos a causas naturales y antrópicas.
Los movimientos de las laderas se ven afectados esencialmente por el tipo de litología, estado de meteorización y erosión de la roca, presencia de escorrentía y lluvias estacionales, como así también la acción del hombre en obras civiles y urbanísticas.
Las geoformas observadas en el área de estudio, según los agentes generadores son los siguientes:

- Geoformas de acumulación de origen hídrico (depósitos aluviales, conos aluviales, abanicos aluviales, terrazas fluviales, delta, depósitos coluviales).
- Geoformas de origen denudativo (Glacis: de erosión, cubierto, de acumulación, y paleoglacis; y superficies de aplanamiento).
- Geoformas de origen eólico: yardang.
- Geoformas de origen antrópico (áreas de movimiento de suelos con construcciones, áreas de desmonte, áreas inundable, áreas afectadas por incendios).

En el área de estudio las geoformas debidas a procesos de remoción en masa son los procesos más activos y abundantes de la quebrada del río Los Sauces, se presentan en las laderas de pendientes abruptas (ver Figura 3).
Tanto los procesos de movimiento en masa como los de erosión, meteorización y desborde de los arroyos y ríos, constituyen fenómenos naturales en la evolución del relieve, generando así cambios ambientales. El éxito de la capacidad predictiva de algunos modelos y las potenciales aplicaciones en los campos de planificación urbana, entre otros, da inicio en las últimas décadas a la geomorfología aplicada. Esta aplicación se centra básicamente en la interacción entre acciones humanas y las formas de la tierra, en particular enfocándose en el manejo de riesgo causados por cambios en la superficie de la tierra (naturales o inducidos) conocidos como riesgo geológico.



Figura 3. Procesos de remoción en masa en el sector de la Quebrada.

FACTORES DE CONTROL

Los factores que controlan los procesos, sobre todo los movimientos de ladera, pueden quedar agrupados en factores desencadenantes y factores condicionantes [14]. Los primeros están unidos a la propia naturaleza, composición, estructura y forma de terreno, mientras que los desencadenantes pueden ser considerados como "externos", ya que al actuar sobre el terreno provocan o desencadenan los procesos al modificar las condiciones de equilibrio pre-existentes.

Factores desencadenantes

En la quebrada del río Los Sauces, las precipitaciones, la erosión por escorrentía y la acción antrópica constituyen los factores desencadenantes de los procesos observados (ver Figura 4).

El efecto que provoca sobre los materiales es el incremento de las presiones intersticiales y el flujo de agua a través del terreno. Esto genera una disminución en la resistencia al corte de los materiales, además de elevar su peso e influir en sus propiedades resistentes. En la quebrada de Los Sauces, la mayor parte de las lluvias tiene lugar durante el período estival, lo que genera la saturación estacional de los materiales porosos, provocando erosión por escorrentía y favoreciendo los procesos de remoción en masa que se observan en el área de estudio.



Figura 4. Factores desencadenantes debidos a la acción antrópica y la erosión por escorrentía en sector del dique Los Sauces.

Según registros históricos sobre eventos de desastres ocasionados por las precipitaciones y la remoción en masa en la zona, el 21 de febrero de 1.992 cayeron 65 mm (media anual 187 mm), el 18 de diciembre de 1.994 se derrumbó un cerro en el Km10 de la ruta nacional 75 que comunica la ciudad capital de La Rioja

con la localidad de Sanagasta producto de las copiosas lluvias producidas después de un incendio en la zona, mientras que el 15 de marzo de 1.997 se produjo la tormenta donde cayeron 96 mm en 50 minutos produciendo crecida del río Los Sauces, esto anegó las áreas que circunda destruyendo la ruta nacional 75 y remociones en masa que arrasó con las viviendas del sector de la quebrada de Los Sauces, a finales del mes de diciembre 2.013 y comienzos del año 2.014 se produjeron copiosas lluvias que produjeron la ocurrencia de numerosos movimientos de ladera que mantuvieron cortada la ruta nacional 75 por varios días.
El factor antrópico juega un papel importante en los cambios que introduce al relieve, debido a la falta de estudios previos de la zona en la que se realizan movimientos de suelos para la ejecución de obras urbanísticas, como rutas o emprendimientos edilicios.
De esta manera se han identificado acciones, que, operando de manera conjunta con las precipitaciones, generaron procesos de remoción en masa. Por un lado, la desestabilización de las laderas que se produce por los cambios en la geometría y pendiente de las laderas, como consecuencia de la necesidad de construir una nueva ruta de circulación alrededor del Dique Los Sauces y construcción de emprendimientos edilicios y futura urbanización del área, llevada a cabo por el estado provincial, razón por la cual se han expropiado tierras desde el año 2.012 hasta la fecha. Por el otro, la propagación de incendios forestales intencionales en la zona del Cerro de La Cruz, provocó la pérdida más de 15.000 hectáreas el 25 de noviembre de 2.013. La pérdida de cobertura vegetal y por ende protección como consecuencia de este evento, se tradujo en la aparición de numerosos deslizamientos traslacionales durante las tormentas de verano durante el mes de diciembre de 2.013 y enero 2.014.

Factores condicionantes
Litología: La litología cumple un papel muy importante en el control del tipo de movimiento generado. De esta forma, se observó que los deslizamientos de detritos y derrumbe en "seco" sólo se registraron en materiales esquistosos y material sedimentario deleznable.
En el caso de los deslizamientos de detritos y de suelo, ocurrieron en casi todas las litologías, lo que sugiere que el control de los mismos está dado por la interface roca fresca-material meteorizado y por el grado de pendiente (ver Figura 5).
La combinación del factor litológico y el grado de meteorización es de singular importancia en las áreas que afectan al basamento metamórfico.

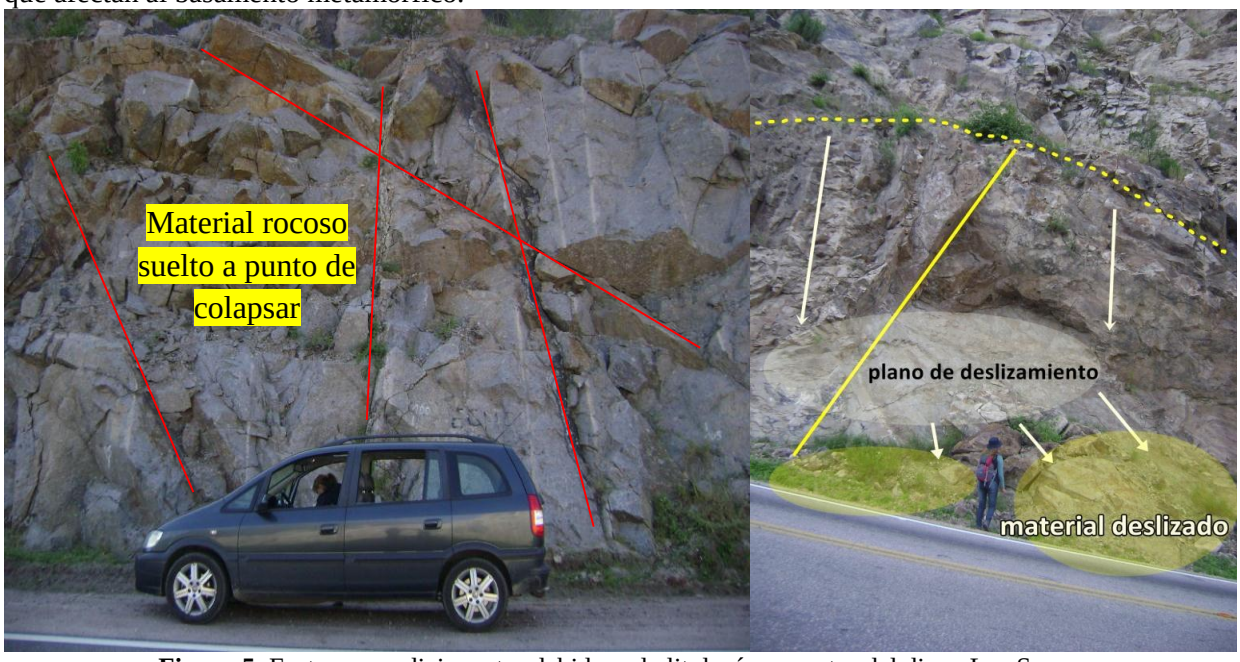


Figura 5. Factores condicionantes debidos a la litología en sector del dique Los Sauces.

Pendientes: La pendiente cumple un rol preponderante en el control de los procesos de remoción en masa, toda vez que se trata de movimientos gravitacionales por excelencia. En el sector de estudio predominan las pendientes altas, propias del relieve montañoso. Casi la totalidad de los movimientos identificados se

produjeron en pendientes superiores a 15°, mientras que los eventos de mayor magnitud acontecieron a partir de los 30°. Se debe tener en cuenta que las pendientes antes mencionadas son generales para todo el sector, por lo que en algunos procesos tiende a ser más importante la pendiente del talud que la pendiente general del terreno; es el caso de los procesos de deslizamientos de detritos bajo condiciones "secas" y de caída de rocas.

La pendiente es el gradiente de inclinación de la línea de máxima pendiente tangente al terreno en un punto respecto a la horizontal. Se suele expresar en porcentaje, y en grados sexagesimales. Atendiendo a la clasificación [17], que ha aplicado el método de pendientes en zonas montañosas con fuertes desniveles, similar al área de trabajo, los rangos obtenidos son:

0-5° (pendiente suave),
5-15° (pendiente moderada),
15-25° (pendiente fuerte),
25-35° (pendiente muy fuerte),
35-90° (pendiente vertical o subvertical)

Con estas clases se elaboró el plano de pendientes según zonas de susceptibilidad de riesgo geológico de tipo remoción en masa (ver Figura 6). La principal característica de la zona es que, si consideramos la sumatoria de los porcentajes de pendientes superiores a15°, casi el 70% del terreno presenta pendientes por encima de los 15º.

Siguiendo el mismo sistema, el 40 % de la zona está ocupado por pendientes fuertes y el 30% tiene una pendiente muy fuerte. Estas zonas de pendiente muy fuerte coinciden con el área de la quebrada por donde discurre el río Los Sauces.

El factor de orientación puede influir en el inicio de un movimiento de ladera, puesto que está afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, y a su vez está condicionada por la consolidación de los suelos.

En el área de estudio, la orientación de las laderas en las zonas de Alta a Muy Alta susceptibilidad de riesgo geológico de tipo remoción en masa es predominantemente NE-SE, coincidente con la cara expuesta a la humedad.

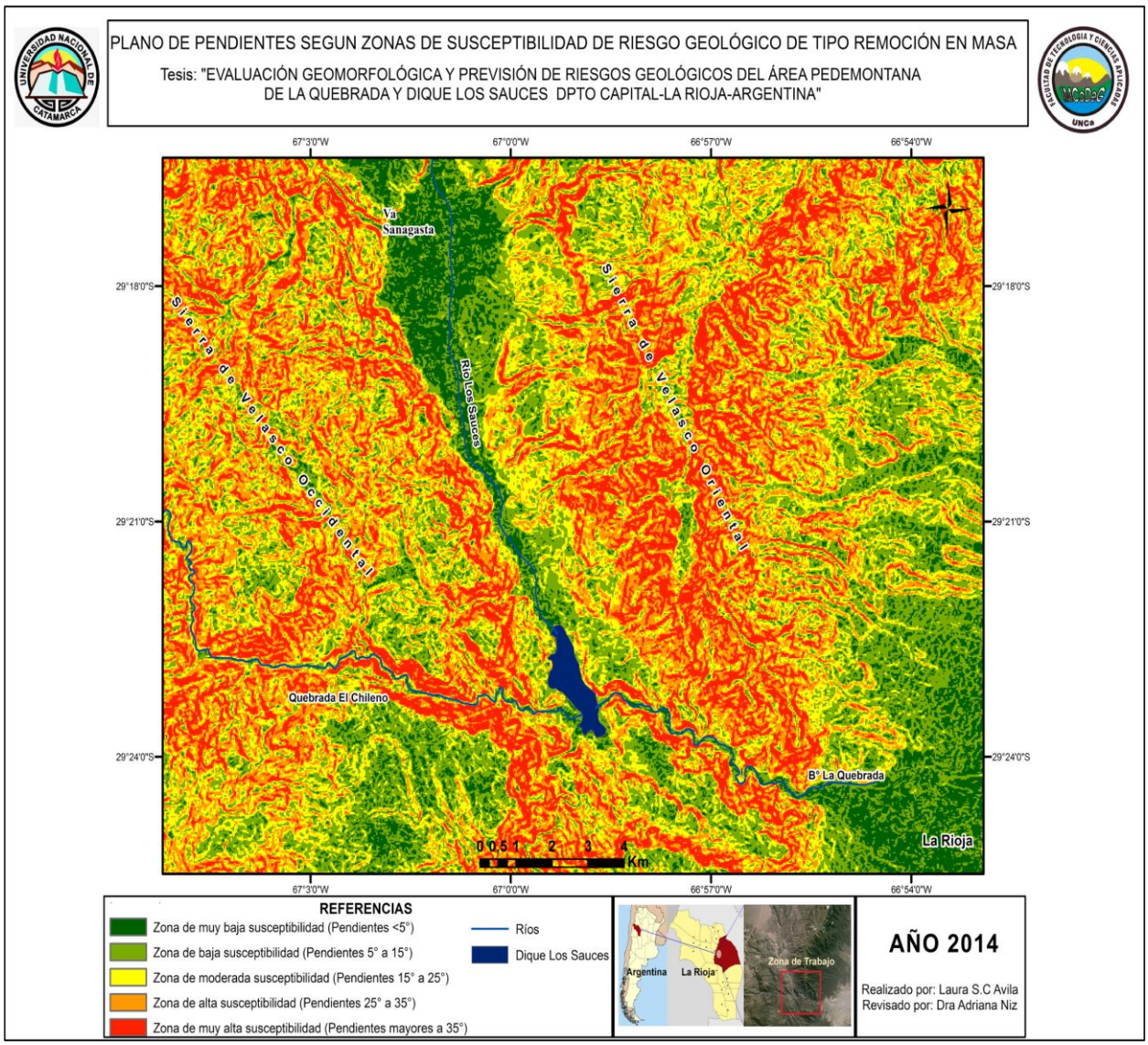


Figura 6. Plano de pendientes según zonas de susceptibilidad de riesgo geológico de tipo remoción en masa.

CONCLUSIONES

Los procesos más comúnmente observados en la Quebrada y dique Los Sauces, son los deslizamientos gravitacionales en seco, entre los cuales, los de mayor magnitud son las avalanchas de detritos en áreas de máxima pendiente de ladera, con ángulos mayores a 30°. Estas al perder energía, por cambios bruscos de la pendiente, desarrollan depósitos de material grueso (bloques y detritos) con potencias mayores a 4 o 5 metros.

Las precipitaciones, la erosión por escorrentía y la acción antrópica, constituyen los factores desencadenantes de los procesos de remoción en masa observados. La mayor concentración de las lluvias tiene lugar durante el período estival, lo que genera la saturación estacional de los materiales porosos; esto provoca erosión por escorrentía y favorece los deslizamientos.

La intervención humana, juega un papel importante en los cambios que introduce al relieve acelerando los procesos morfodinámicos y erosivos.

La litología y las pendientes en la quebrada del río de Los Sauces, son factores condicionantes para el proceso de remoción en masa, tienen lugar principalmente en los sectores en donde afloran las rocas del basamento cristalino, donde la roca se encuentra fuertemente fracturada, meteorizada y expuesta en

laderas de alta pendiente.
La principal característica de la zona es que, aproximadamente el 70% del terreno exhibe una pendiente superior a 15º. El 40 % de la zona presenta pendientes fuertes y el 30 % tiene una pendiente muy fuerte.
Las zonas de pendiente muy fuerte coinciden con el área de la quebrada por donde discurre el río Los Sauces. Una zona amplia tiene una pendiente suave a moderada, coincidente con los valles y bolsones intramontanos de la zona. La pendiente media de la zona es de 20º.
Las pendientes en el sector oeste del río Los Sauces oscila entre 48% a 72% correspondientes a inclinaciones de 15° a mayores de 30°, allí el riesgo de remoción en masa es alto; en cambio las pendientes al este del mencionado río oscilan entre 7% a 32% correspondientes a inclinaciones inferiores a 15°, por lo que allí el riesgo de remoción en masa es moderado
La susceptibilidad al riesgo geológico de tipo remoción en masa cubre el 70% del área correspondiendo a zonas de Alta a Muy Alta susceptibilidad, relacionadas a pendientes mayores a 25° y se encuentran circunscriptas al área montana y limitan la quebrada por la cual discurre el río Los Sauces.
El 30% del área corresponde a zonas de Moderada a Baja susceptibilidad, relacionadas a pendientes menores de 25° y coinciden con la zona pedemontana de valle y bolsones intramontanos.
La orientación de las laderas en las zonas de Alta a Muy Alta susceptibilidad de riesgo geológico de tipo remoción en masa es predominantemente NE-SE, coincidente con la cara expuesta a la humedad

REFERENCIAS

[1] Cravero, O. y González Díaz, E.F. (1.999). *Hoja Geológica 2966-III La Rioja, provincia de La Rioja. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales (inédito)*, 49 p., versión preliminar, Buenos Aires.
[2] Grellet-Tinner, G., Fiorelli, L.E., (2.010). *A new Argentinean nesting site showing neosauropod dinosaur reproduction in a Cretaceous hydrothermal environment*. Nature Communications 1, 32, doi:10.1038/ncomms1031.
[3] Turner, J.C. (1.971). *Descripción Geológica de la Hoja 15d, Famatina, provincia de La Rioja.* Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 126, 96 p., Buenos Aires.
[4] González Bonorino, F. (1.951). *Una nueva Formación Precámbrica en el noroeste argentino*. Com. Cient. Mus. La Plata, 5, la Plata.
[5] Verdecchia, S.O., Baldo, E.G., Benedetto, J.L. y Borghi, P.A. (2.007). *The first shelly faunas from metamorphic rocks of the Sierras Pampeanas (La Cébila Formation, Sierra de Ambato, Argentina): age and paleogeographic implications*. Ameghiniana 44: 493-498.
[6] Pieroni, E. M. (2.004). *Análisis paleoflorístico y paleoambiental del Neopaleozoico del área del dique Los Sauces, provincia de La Rioja*. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, Seminario, 120 p., Tucumán.
[7] Fiorelli, L.E., Grellet-Tinner, G., Alasino, P.H., Argañaraz E. (2.012). *The geology and palaeoecology of the newly discovered Cretaceous neosauropod hydrothermal nesting site in Sanagasta (Los Llanos Formation), La Rioja, northwest Argentina*. Cretaceous Research 35 (2012) 94e117
[8] Bodenbender G., (1.911). *Constitución geológica de la parte meridional de La Rioja y regiones limítrofes, República Argentina*. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba 19: 5-221.
[9] Sánchez, M.; Spagnotto, S.; Martínez, M. (2.013). *Rasgos estructurales en la sierra pampeana de Velasco y alrededores a partir de los campos gravimétricos y magnetométricos*. Rev. Asoc. Geol. Argentina vol.70 N°2 Buenos Aires.
[10] Caminos, R. (1.979). *Sierras Pampeanas Noroccidentales, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan*. 2° Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba 1: 225-291.
[11] Ramos, V.A., (1.988). *Late Proterozoic–Early Paleozoic of South America – a Collisional History*. Episodes, 11(3): 168-173.
[12] Costa, C. (2.008). *Neotóctonica. Caracterización preliminar del peligro sísmico en la provincia de La Rioja*. En Gonzalez, M.A., Gonzalez diaz, E.F., Elissondo, M., Juarez, P., Coppolecchia, M.,

Costa, C., Cisneros, H., Tello, G. y Hunicken, H. (eds.) Peligrosidad sísmica en la sierra de Velasco, provincia de La Rioja. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas: Peligrosidad Geológica 14: 30-65, Buenos Aires.
[13] Sayago, José M., (1.986). *Grandes unidades geomorfológicas de la Argentina*. (Centro Editor de América Latina): 108-109.
[14] Fernández, T. (2.001). *Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.648 pp.

ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE LAS FRACCIONES RECALCITRANTES DE HIDROCARBURO

Gálvez, José A.; Cantero, José A.; López, Andrea C.; Vardaro, Sergio, A.

Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

e-mail: jgalvez@uncu.edu.ar

El tratamiento biológico de hidrocarburos en suelo implica una interacción entre las poblaciones microbianas que actúan sobre el compuesto orgánico. La biodegradabilidad de un compuesto orgánico se debe a que es utilizado por el microorganismo como fuente de carbono. No todos los compuestos se degradan con la misma facilidad, dependiendo de la estructura molecular de los mismos y de la longitud de cadena. Hay un grupo de hidrocarburos con moléculas de más de 30 átomos de carbono que se consideran recalcitrantes.
En los tratamientos de biodegradación de hidrocarburos en suelo en Argentina se ha observado durante el proceso que no se logra una correspondencia entre la concentración de hidrocarburos medida por diferentes técnicas al inicio y fin del tratamiento.
Se han llevado a cabo procesos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas aireadas por remoción mecánica. La evolución de las concentraciones de hidrocarburos se evaluó mediante tres técnicas analíticas: cromatografía gaseosa, espectrofotometría infrarroja y destilación simulada por cromatografía, lo que permite realizar un balance de materia del proceso de tratamiento, como mínimo al inicio, en un punto intermedio y al final del mismo. De esta forma se determina la fracción recalcitrante como la diferencia entre la concentración medida por estas técnicas.
Al determinar las concentraciones por espectrofotometría y por cromatografía no se mantiene la relación entre los hidrocarburos cromatografiables y los determinados por espectrofotometría. Según estos estudios preliminares la fracción recalcitrante disminuye; por lo que los hidrocarburos considerados recalcitrantes serian parcialmente degradables.
De este análisis se puede establecer en algunos casos una vida media promedio de estos grupos, tal como se hace en análisis de toxicidad, migración y permanencia de hidrocarburos contaminantes en el ambiente. Esta vida media calculada varía en las diversas etapas del proceso, pudiendo verificarse dos etapas como mínimo en base a los datos disponibles.

Palabras Clave: Biorremediación, Hidrocarburos, Biodegradabilidad, Fracción recalcitrante

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos por técnicas biológicas es una práctica aplicada en el oeste de Argentina en forma experimental entre 1992 y 1996, comenzando su aplicación en gran escala entre 1997 y 1998 hasta nuestros días. Este proceso utiliza la capacidad metabólica de los microorganismos para degradar el hidrocarburo en el suelo en forma aeróbica, lo que constituye un proceso de oxidación [1], [2], [3].

Los mismos utilizan el contaminante orgánico como fuente de carbono, para llevar a cabo el proceso, además es necesario incluir una fuente de nitrógeno, fósforo y a veces potasio, además de mantener la humedad en el suelo. [3] [4] [5].

Las reacciones de oxidación son las de mayor importancia en biodegradación de hidrocarburos en condiciones aeróbicas. Están catalizadas por monooxigenasas, dioxigenasas, lacasas y peroxidasas. Se requieren condiciones aeróbicas para estas reacciones porque el oxígeno, además de funcionar como aceptor final de la respiración, es un reactivo obligado en las reacciones de transformación. Las velocidades y vías degradativas de los contaminantes en suelos están determinadas por factores que son específicos de la naturaleza del contaminante, del suelo, de los microorganismos degradadores del compuesto y de la interacción entre ellos. La estructura de la molécula del contaminante determina sus propiedades físicas y químicas así como su biodegradabilidad inherente. El contenido de materia orgánica y arcilla de los suelos juega un rol crítico en la biodisponibilidad del contaminante. Superficies altamente adsortivas como la arcilla y fracciones de materia orgánica limitan la biodisponibilidad de los hidrocarburos del petróleo a los microorganismos del suelo. Esto es particularmente importante en suelos intemperizados donde los contaminantes tuvieron tiempo para migrar hacia los microporos y hacerse menos accesibles al ataque microbiano [3] [4] [5].

La biodegradabilidad de un compuesto orgánico varía con la estructura molecular. No todos los compuestos se degradan con la misma facilidad:
- Los compuestos alifáticos de cadena lineal (parafínicos) se degradan fácilmente, pero cuando se incluyen como sustituyentes alcanos de cadena larga, se forman estructuras ramificadas estéricamente inaccesibles para la degradación. De la misma forma, los compuestos alifáticos insaturados se degradan más lentamente que los saturados.
- Los compuestos aromáticos simples se degradan por diferentes aperturas del anillo. La incorporación de halógenos disminuye la degradabilidad por estabilización del anillo. También se pueden degradar los compuestos aromáticos policlorados como los policlorobencenos cuya biodegradabilidad disminuye al aumentar el número de átomos de Cloro en la molécula.
- Los compuestos nitrogenados y azufrados se degradan lentamente. Los compuestos más resistentes al ataque microbiano son las fibras sintéticas, aunque se están aislando microorganismos capaces de degradar estos compuestos [3] [4] [5].

Se considera que los hidrocarburos que contienen cadenas de más de 35 átomos de carbono no son biodegradables, independientemente del proceso biológico utilizado [5] [6] [7].

Las técnicas de tratamiento de suelos que se pueden aplicar en gran escala son:
Landfarming se basa en oxigenación del suelo por la remoción mecánica a de capas de reducido espesor por medio de herramientas de labranza. Las condiciones del suelo son controladas para optimizar la degradación de los contaminantes e incluyen contenido de humedad, aireación, pH e incorporación de nutrientes. Por tratarse de capas de escaso espesor, el suelo bajo tratamiento es afectado fuertemente por las condiciones ambientales externas, es decir vientos, lluvias, cambios térmicos, irradiación, etc.
Biopilas consiste en un proceso de aireación estática de un volumen de suelo especialmente acondicionado mediante el uso de compresores o sopladores. Al igual que en landfarming, para incrementar la biodegradación de deben controlar humedad, nutrientes, oxígeno y pH. En *biopilas* se puede controlar además la temperatura, que es una variable importante del proceso biológico.
Acumulación aireada que consiste en tratar suelo excavado en pilas de altura variable, oxigenadas mecánicamente mediante el uso de maquinaria vial o minera (excavadoras, cargadora frontal, etc). Al igual que en las anteriores, es necesario controlar humedad, nutrientes, oxígeno y pH. También es posible controlar temperatura, lo cual aumenta fuertemente su potencialidad como tecnología. El efecto de la remoción mecánica en profundidad incrementa drásticamente los fenómenos de transferencia de materia, que en biodegradación de hidrocarburos en suelo suelen ser los principales limitantes de la cinética global del proceso. Las tres técnicas mencionadas operan bajo el concepto de *reactores biológicos en fase sólida* [5] [6] [7] [8] [9] [10].

Durante los procesos de tratamiento biológico de suelos en las condiciones ambientales y de trabajo de yacimiento petrolero del centro oeste de Argentina se ha encontrado al realizar balances de materia del hidrocarburo para control de proceso y cuantificar su degradación midiendo el hidrocarburo por distintas técnicas analíticas no se logra mantener la correspondencia entre las distintas fracciones de hidrocarburo por lo que algunos compuestos considerados recalcitrantes serían afectados por los microorganismos en diversa medida.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Técnica de biorremediación

Para llevar a cabo los procesos de biodegradación se seleccionó la técnica de biopilas aireadas por remoción mecánica por ser la más práctica de aplicar en nuestro país [8] [9] [10]. Para ello se construyeron cinco unidades de tratamiento. Las características de las mismas se indican en la Tabla I.

Tabla I. Caracterización del suelo y de los contaminantes

Biopila	**Concentración inicial (g/kg)**	**Volumen m^3**	**Textura**	**Densidad ton/m^3**	**Conductividad dS/m**
UT4 F1	35	1200	Areno arcilloso	1,3	61
UT4 F2	33,8	1200	Areno arcilloso	1,3	61
UT4 F3	46,1	1200	Areno arcilloso	1,3	61
UT4 F4	46,2	1200	Areno arcilloso	1,3	61
YCB 2	26	800	Arena	1,31	16

El proceso se llevó a cabo removiendo el suelo dos veces con excavadora al mes para airear el suelo y se incorporaron nutrientes (Urea y Fosfato de Amonio calidad fertilizante) bimestralmente. La tasa de incorporación de nutrientes se basó en la relación Hidrocarburos: Nitrógeno: Fósforo 100:10:1 necesarias para degradar un 30 % del hidrocarburo en dos meses. Debido a la dificultad de obtener agua dulce en la zona (el punto de abastecimiento más cercano se encontraba a 20 km), el aporte de la misma se hizo mediante las lluvias y el agua de origen biogénico, producto de descomposición del hidrocarburo.

Toma de muestras

En todas las biopilas se tomaron muestras ponderadas compuestas de 5 muestras puntuales cada una. De esta forma se tomaron dos muestras por biopila una correspondiente a la zona superior y otra correspondiente a la zona inferior. Las muestras para determinación de hidrocarburos se colocaron en frascos de vidrio y se llevaron refrigeradas al laboratorio.

Técnicas analíticas

Los métodos analíticos para determinación de Hidrocarburos fueron los siguientes [11] [12]:

- Hidrocarburos totales de petróleo: EPA 418.1. Esta técnica permite detectar hidrocarburos hasta compuestos de 65 o más átomos de carbono, pero no puede identificar componentes.
- Hidrocarburos cromatografiables: EPA 8015: determina las fracciones GRO-DRO-RO. Permite cuantificar e identificar compuestos hasta 35 átomos de carbono. Discrimina entre alifáticos y no alifáticos.
- Destilación simulada basada en EPA 8015, sirve para determinar los compuestos que son retenidos en el inyector del cromatógrafo.

Los métodos analíticos para el seguimiento de nutrientes en el proceso de biorremediación fueron:

- Nitrógeno edáfico: Método modificado para suelos contaminados basado en Mét. Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales 4500-Norg B Mét Macro-kjeldahl. Análisis químicos de suelos, Jackson 3ªEd.
- Fósforo asimilable: Método de Fósforo absorbido Bray-P1 (6S) Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations Report Nº42, Version 3.0. January 1996.
- Microorganismos Aerobios Degradadores de Hidrocarburos: Método modificado para suelos contaminados con Hidrocarburos. Methods of soil analysis-Part2-Chemical and Microbiological Properties. Second Edition. American Society of Agronomy, Inc.1982.
- PH: en suelos y residuos: Método EPA SW 9045C
- Textura: IRAM 10509:1982
- Conductividad de suelos: USDA, Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. 1999

Caracterización cromatográfica inicial del hidrocarburo presente en el suelo

Para el caso de las biopilas UT4 F1, UT4 F2, UT4 F3 y UT4 F4 se realizó una única caracterización del hidrocarburo presente en el suelo. Las caracterizaciones cromatográficas del conjunto UT4 y de YCB 2 se muestran en los figuras 1 y 2.

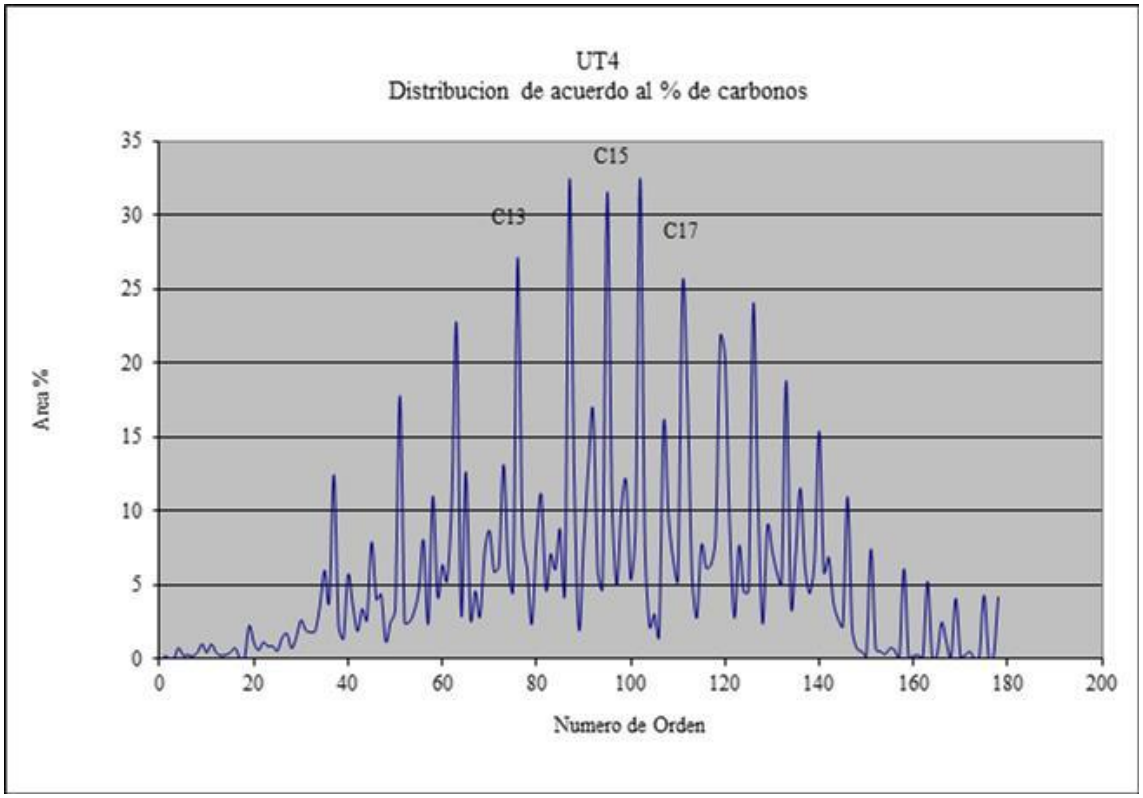


Figura 1. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en el suelo de las biopilas UT4 F1, UT4 F2, UT4 F3 y UT4 F4.

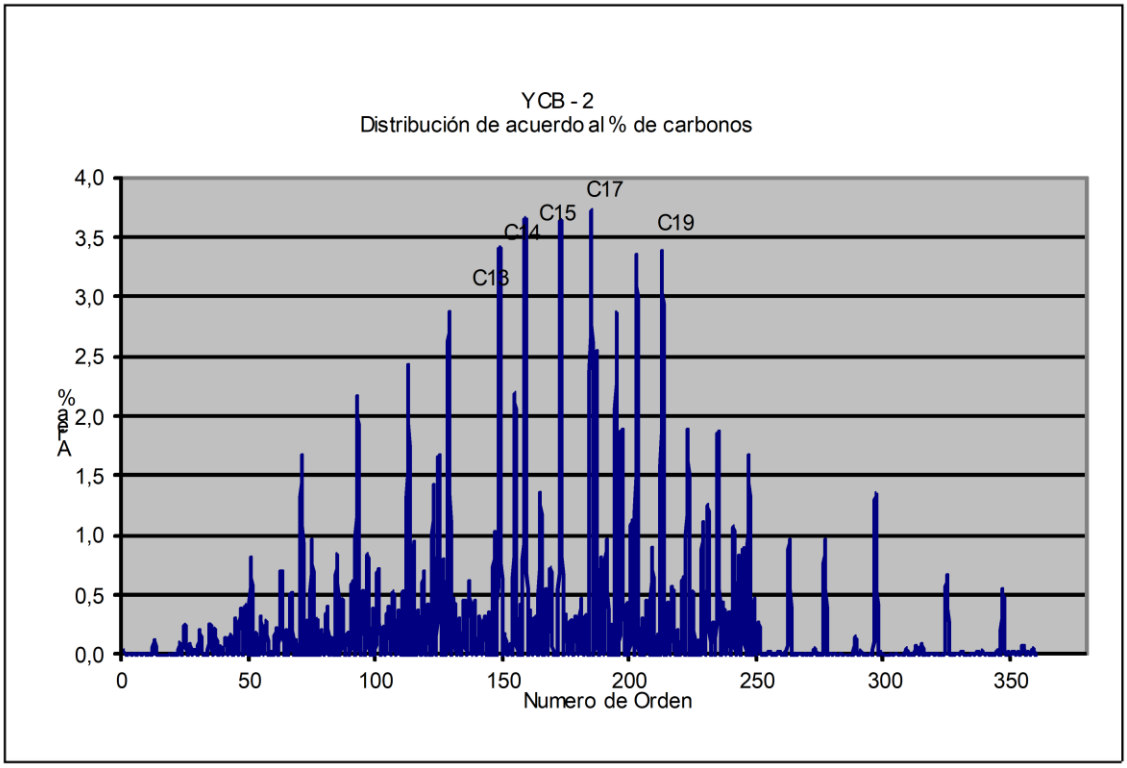


Figura 2. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en el suelo de la biopila YCB 2.

En todos los casos el hidrocarburo predominante corresponde a la fracción diesel (DRO).

Determinación de la concentración de hidrocarburos no cromatografiables

Para determinación de los hidrocarburos no cromatografiables se recurrió a un método indirecto basado en un balance de materia. En nuestro caso se consideró que el total de hidrocarburos del suelo se determina mediante la técnica EPA 418.1. Luego se determina la concentración de hidrocarburos por cromatografía. Al primer resultado se le resta el segundo obteniendo la concentración de hidrocarburos no cromatografiables de acuerdo al esquema de la figura 3 [12]

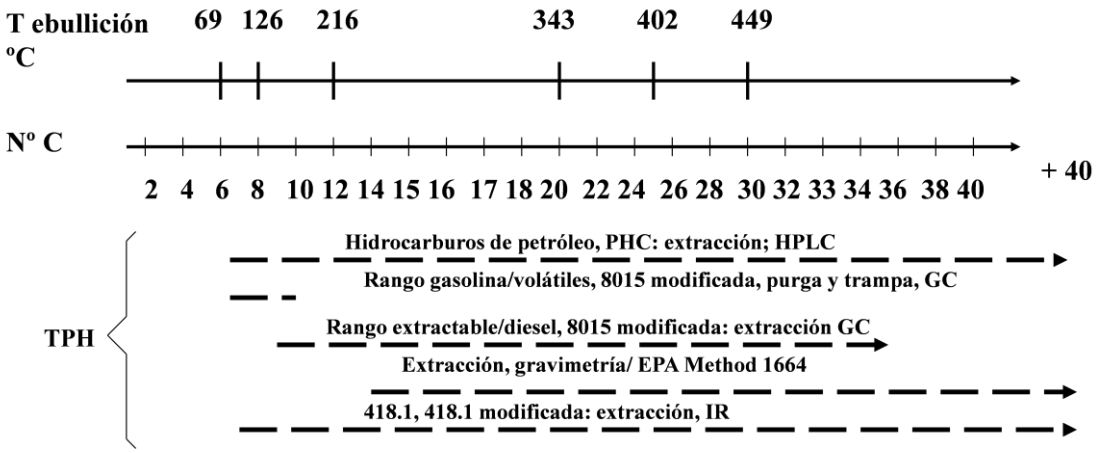


Figura 3. Detalle de técnicas analíticas y alcance de las mismas según el número de átomos de carbono del hidrocarburo

RESULTADOS

Degradación de hidrocarburos en biopilas

En las figuras 4, 7 y 10 se indica la variación de la concentración de hidrocarburos en el suelo en tratamiento. En los figuras 5, 6, 8, 9 y 11 se indica la composición cromatográfica de los hidrocarburos al final de proceso de degradación. Todas las muestras fueron extraidas por duplicado para compensar las variaciones del proceso de degradación debido a la heterogeneidad del suelo y los factores ambientales. Se muestran los resultados promedio.

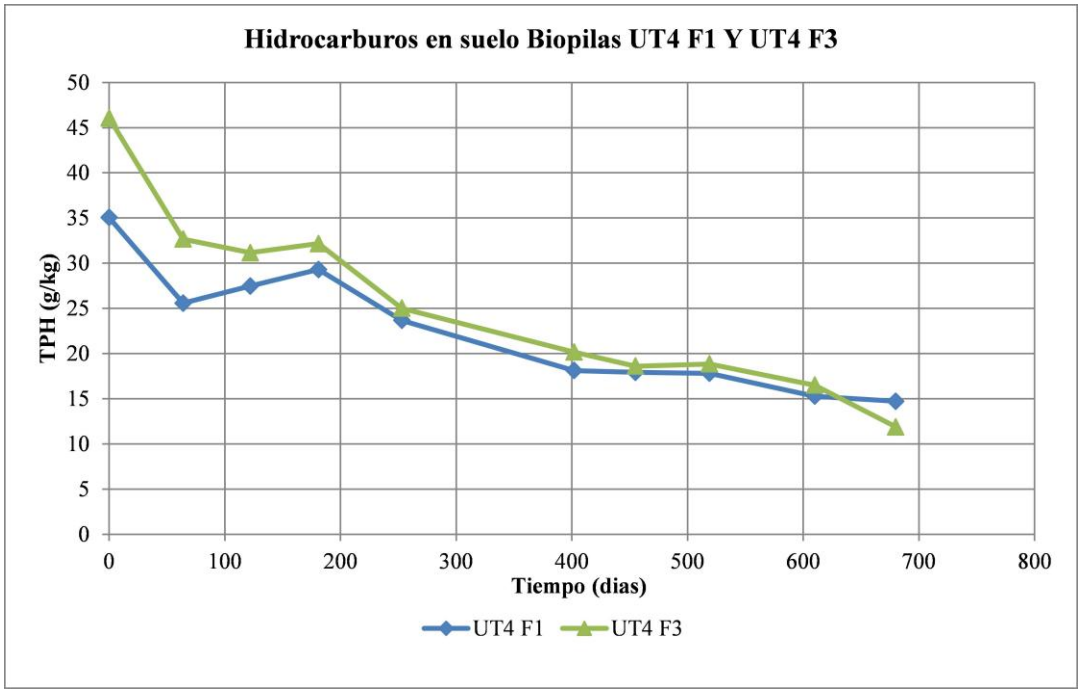


Figura 4. Proceso de degradación de hidrocarburos en suelo en las biopilas UT4 F1 y UT4 F3

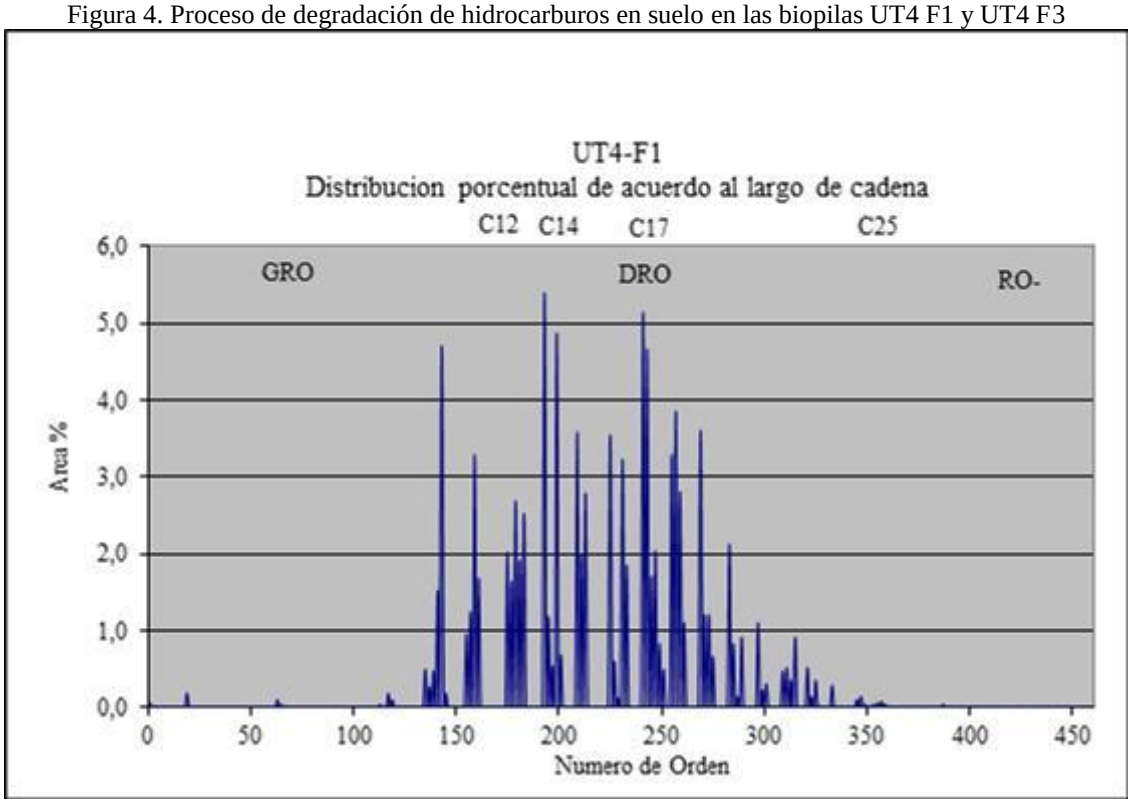
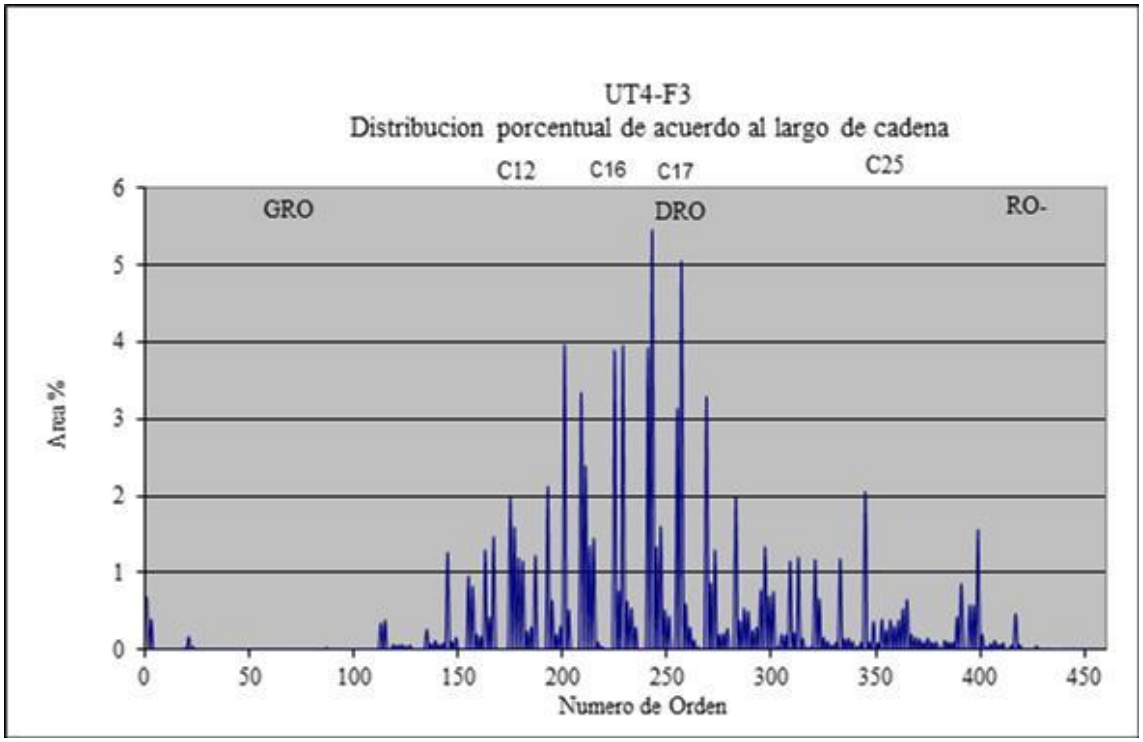


Figura 5. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en la biopila UT4 F1 al final del proceso



.

Figura 6. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en la biopila UT4 F3 al final del proceso

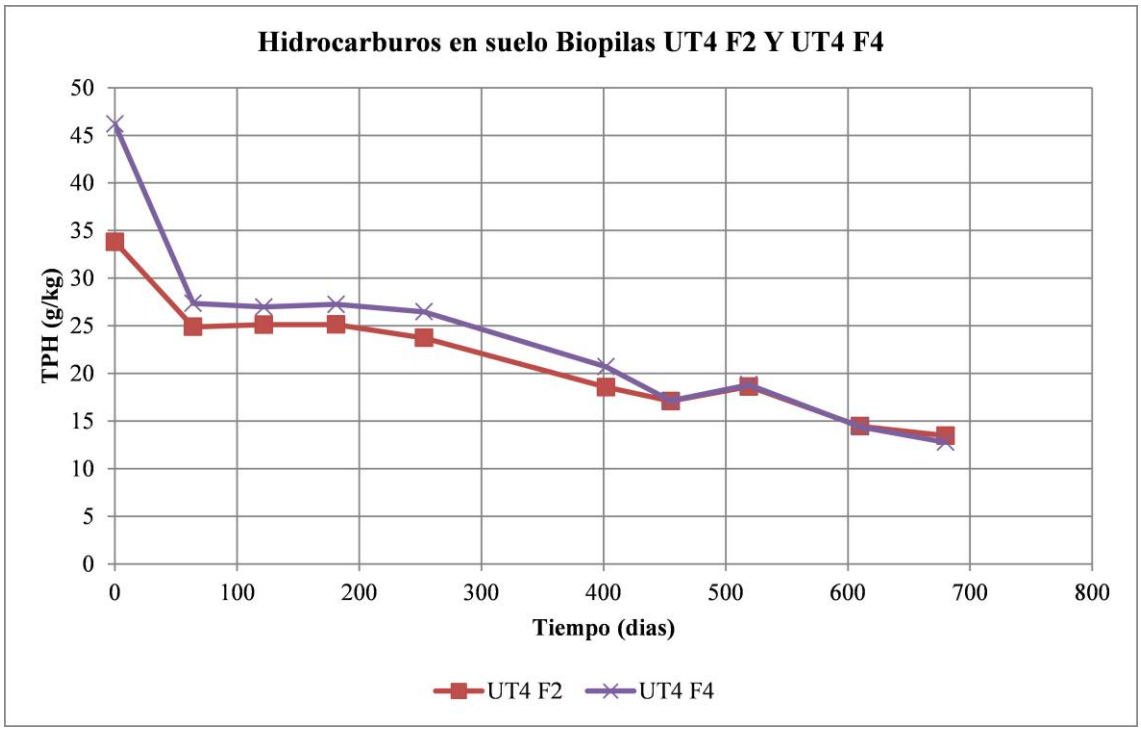


Figura 7. Proceso de degradación de hidrocarburos en suelo en las biopilas UT4 F2 y UT4 F4

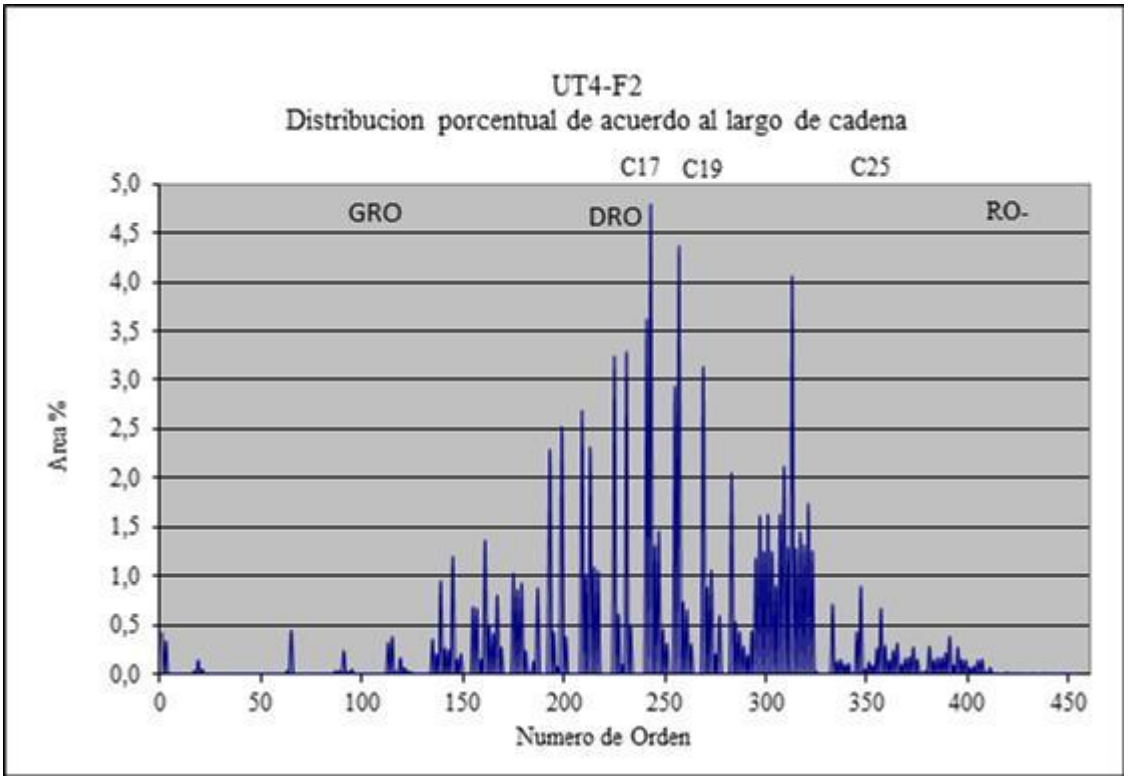


Figura 8. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en la biopila UT4 F2 al final del proceso

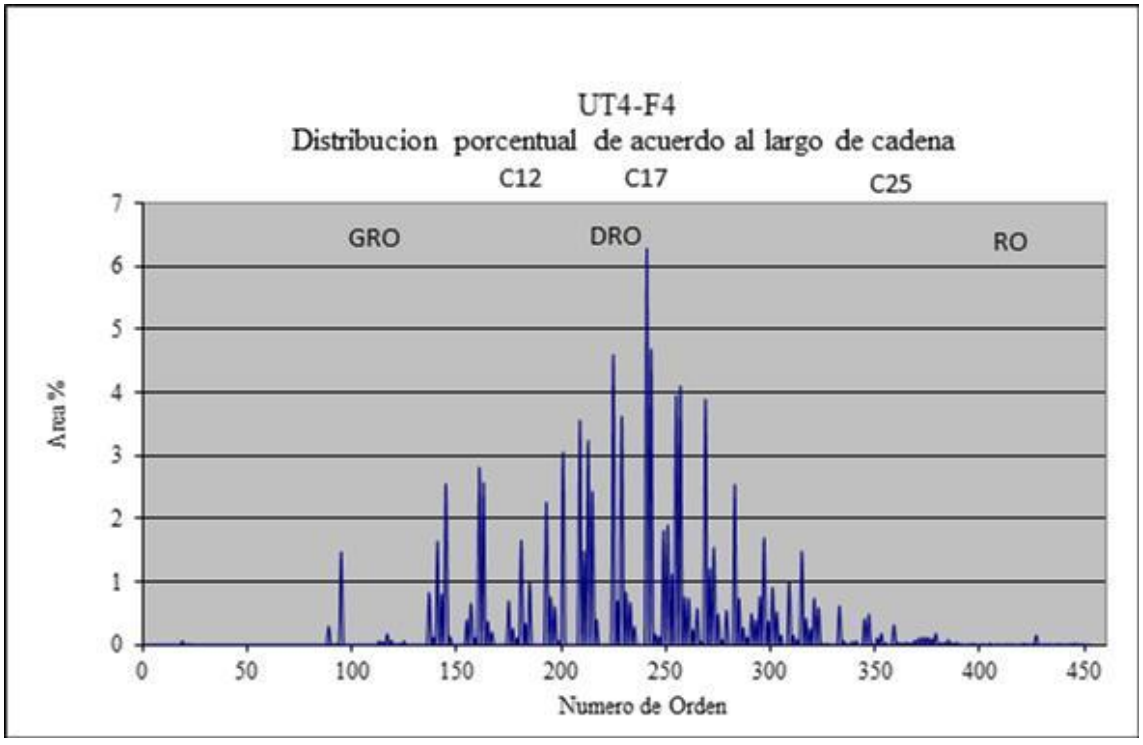


Figura 9. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en la biopila UT4 F4 al final del proceso

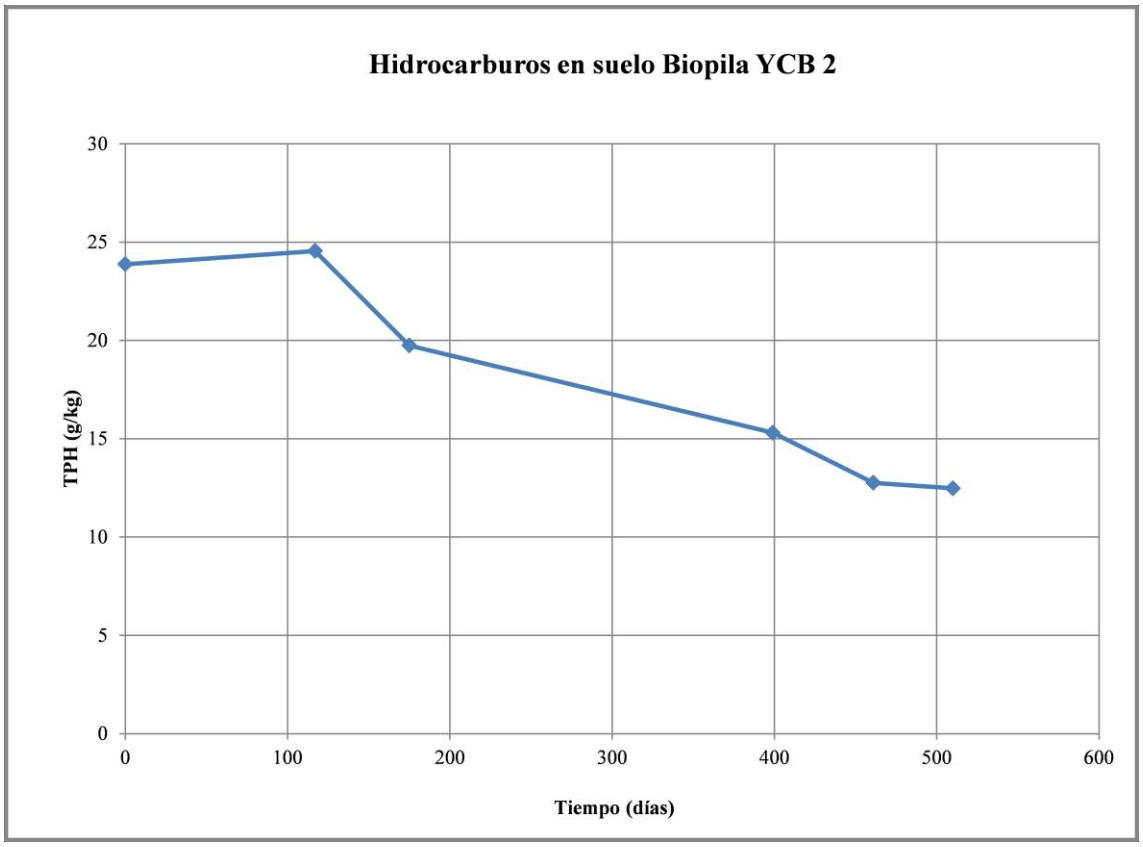


Figura 10. Proceso de degradación de hidrocarburos en suelo en la biopila YCB 2

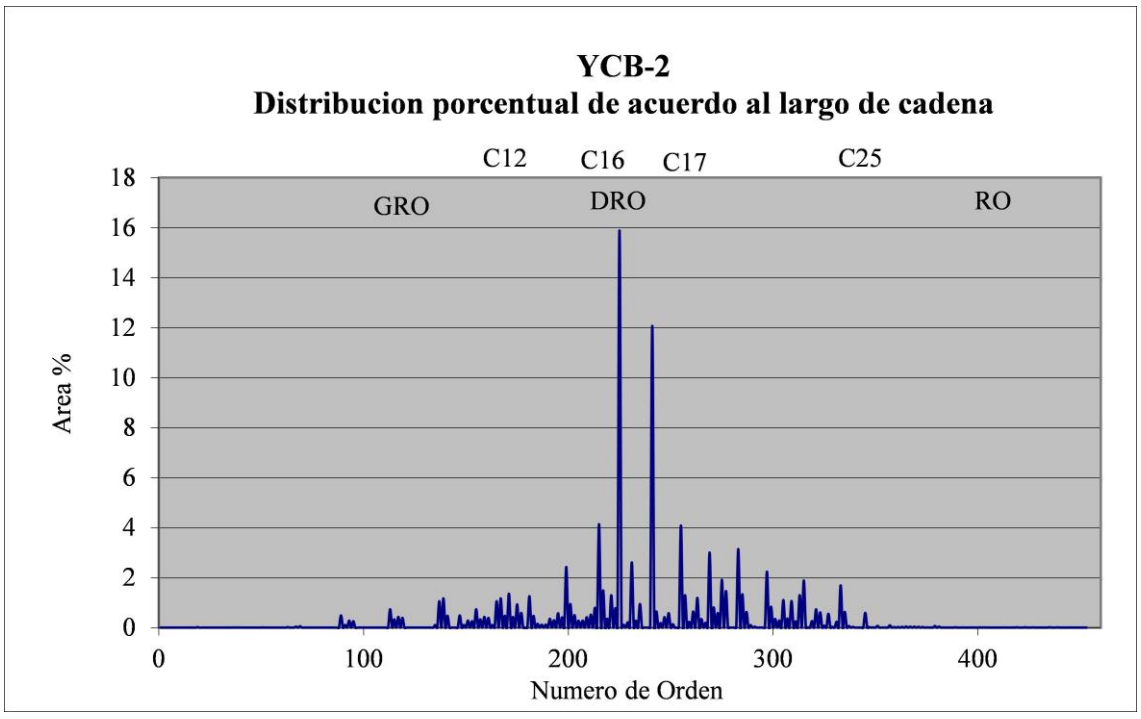


Figura 11. Caracterización cromatográfica del hidrocarburo en la biopila UT4 F4 al final del proceso

Hidrocarburos no cromatografiables

En la tabla II se muestran las concentraciones de la fracción de hidrocarburos no cromatografiables. Los mismos se determinaron como la diferencia entre hidrocarburos totales de petróleo y los hidrocarburos determinados por cromatografía. Se pueden distinguir dos periodos en el caso de las biopilas UT4 F1, UT4 F2, UT4 F3 y UT4 F4.

Tabla II. Caracterización del suelo y de los contaminantes

Tiempo (días)	**Concentración de hidrocarburos no cromatografiables por biopila (g/kg)**				
	UT4 F1	**UT4 F2**	**UT4 F3**	**UT4 F4**	**YCB 2**
0	12,94	11,71	23,98	24,08	12,75
455	7,61	5,44	6,42	4,96	-
510	-	-	-	-	7,20
680	7,18	6,57	4,99	6,74	-

Vida media aproximada de las fracciones recalcitrantes

Se determinó la vida media aproximada de la fracción no cromatografiable. Se consideró la disminución de la concentración y el tiempo requerido para ello, y luego se determinó el tiempo necesario para alcanzar la mitad de la concentración inicial; en caso de no alcanzarse la misma en el periodo de tiempo del ensayo se extrapoló la línea de tendencia. Este método da resultados aproximados y sólo se pudo determinar en el caso de las biopilas UT4 F1, UT4 F2, UT4 F3 y UT4 F4 como válido. Los resultados de vida media se indican en la tabla III.

Tabla III. Vida media aproximada de la fracción recalcitrante calculada para cada periodo de estudio.

Biopila	**Vida media calculada (horas)**		
	Periodo inicial	**Periodo final**	**Observaciones**
UT4 F1	13300	50500	Periodo final extrapolado
UT4 F2	10200	--	
UT4 F3	7500	29000	Periodo final extrapolado
UT4 F4	6900	--	
YCB 2	14000	--	Periodo inicial extrapolado

DISCUSIÓN

Al realizar los procesos de degradación de hidrocarburos en suelo en condiciones de agua mínima se observó al realizar los balances de materia necesarios para llevar a cabo la

incorporación de nutrientes requeridos para el proceso biológico que los hidrocarburos no cromatografiables que se consideran no biodegradables disminuyen su concentración.

Esta disminución se ha determinado por balance de materia y se observa una disminución importante hasta llegar a concentraciones comprendidas entre 4,9 y 7,6 g/kg en un periodo de tiempo del orden de 450 a 510 días de proceso, partiendo de dos rangos totalmente diferentes de concentración inicial de este grupo de compuestos (24 g/kg y 12,5 g/kg aproximadamente).

En el caso de las biopilas UT4 F1, UT4 F2, UT4 F3 y UT4 F4 se realizó una caracterización cromatográfica intermedia y otra final. Entre las dos últimas no se observó una variación concluyente de la fracción en estudio, si bien el 50 % de los resultados indican una disminución. Esta variación aleatoria puede deberse a las limitaciones del método de estudio del proceso en especial a concentraciones bajas.

Si se determina la disminución de la concentración en función del tiempo y se la utiliza para estimar la vida media de esta fracción, se encuentran valores que oscilan entre 10000 y 14000 h cuando se comienza a degradar a partir de concentraciones del orden de 12,5 g/kg y de 6900 a 7500 h cuando se trabaja con concentraciones del orden de 24 g/kg para un hidrocarburo del mismo tipo.

Esta variación puede deberse a varias causas:

- distribución de compuesto de hidrocarburo variable debido a procesos de intemperización diferentes durante el periodo de almacenamiento y construcción de la biopila.
- distribución heterogénea de nutrientes en el suelo.
- remoción del suelo afectada por periodos de lluvia que impidieron la adecuada aireación en dos biopilas (UT4 F1, UT4 F2 e YCB 2).
- Menor biodisponibilidad de hidrocarburos en las biopilas UT4 F1, UT4 F2 e YCB 2 debido a un mayor tiempo de intemperización permitiendo retener en mayor forma a los compuestos orgánicos dentro de la matriz de arcilla presente en el suelo
- No se considera en este caso la influencia de la conductividad del suelo en la actividad biológica ya que se tienen vidas medias similares (dentro de los límites del método) entre las biopilas UT4 F1, UT4 F2 y YCB 2, cuyas conductividades son del orden de 61 dS/m en los dos primeros casos y 16 dS/m en el último caso

Para lograr obtener mejores datos de vida media de forma a lo definido para fracciones de hidrocarburos se requiere un estudio más profundo con equipamiento y técnicas analíticas que permitan obtener las concentraciones de hidrocarburos en las fracciones con más de 35 átomos de carbono en condiciones de proceso totalmente controladas [6],[7].

CONCLUSIONES

Se ha determinado que en procesos de biorremediación de hidrocarburos en suelo hay fracciones de hidrocarburo con más de 35 átomos de carbono que sufren una disminución en su concentración.

Se ha encontrado en forma indirecta que esta fracción tiene una vida media del orden 10000 y 14000 h cuando se comienza a degradar a partir de concentraciones de hidrocarburos no cromatografiables del orden de 12,5 g/kg y de 6900 a 7500 h cuando esta concentración es del orden de 24 g/kg. Esta diferencia puede deberse a diferentes causas dependiendo del

proceso de tratamiento y las condiciones ambientales que no han sido totalmente controladas.

Para lograr una mejor compresión del proceso estudiado en condiciones de campo se requiere analizar equipamiento y técnicas analíticas que permitan obtener las concentraciones de hidrocarburos en las fracciones con más de 35 átomos de carbono en condiciones de proceso totalmente controladas con suelos extraidos de sitios de tratamiento de suelos afectados con hidrocarburos.

REFERENCIAS

[1] Ercoli, E.; Fuentes B., J; Gilobert, M.; Galvez, J.; Arreghini, M, Tratamiento Biológico de Lodos de Refinería. 2º Simposio de Producción de Hidrocarburos: 497- 506 (1995).

[2] Ercoli, E.; Gálvez, J.; Aranzadi, E.; Santos, A.; Cantassano, P. Tratamiento Biológico Ex-Situ De Residuos Semisólidos De Oleoductos. 1º Encuentro Latinoamericano para la Calidad en la Industria Petrolera: 311-318 (1995).

[3] Ercoli, E.; Gálvez, J.; Di Paola, M.; Cantero, J.; Videla, S.; Medaura, M.; Bauzá, J. Analisis y Evaluacion De Parametros Criticos En Biodegradacion De Hidrocarburos En Suelo. Congreso Producción 2000. III Workshop Latinoamericano sobre aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería de Petróleo. Puerto Iguazú. Argentina. 2000

[4] Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. La Grega, M.D, Buckingham, P.L, Evans, J.C. 1996. Mc Graw Hill

[5] Environmental Bioremediation Technologies, Shree N. Singh, Rudra D. Tripathi. Springer Verlag (Berlín) 2007.

[6] Coulon, F.; Whelan, M.; Paton, G.; Semple, K.; Villa, R; Pollard; S. Multimedia fate of petroleum hydrocarbons in the soil: Oil Matrix Of Constructed Biopiles. Chemosphere 81 (2010) 1454–1462.

[7] Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Croup Series. 1998-1999. Vol. 3.

[8] 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.

[9] Ercoli, E; Calleja, C.; Videla, S.; Segura, O.; Gálvez, J; López, C.; Cantero, J.; Tettamanti, G.; Medaura, C; DiPaola, M.; Vardaro, S.; Caso, R. Technology Evaluation Report For Bioremediation In *Repsol YPF*, Neuquén, Argentina. 2nd International Conference of Petroleum Biotechnology. Mexico DF. Formato CD. 7 de Noviembre de 2003. ISBN 968-489-018-4

[10] Gálvez, José; Cantero, José; Videla, Silvina and Ercoli, Eduardo. Clean Up Practical Limits On Full Scale Bioremediation Processes For Hydrocarbon Contaminated Soils. The Twentieth International Conference on Solid Waste Technology and Management, Chester, PA U.S.A. April 3 – 6, 2005

[11] Cantero, J; Videla, S.; Gálvez, J.; Vardaro, S.; Tettamanti, G. López, A. y Ercoli, E. Límites prácticos de biorremediación de suelos afectados por Petróleo**.** 6tas Jornadas De Preservación De Agua, Aire Y Suelo En La Industria Del Petróleo y Del Gas. Neuquén. Instituto Argentino del Petróleo. Octubre-Noviembre 2005

[12] von Fahnestock, F.M.; Wickramanayake, G.B.; Kratzke, R.J.; Major, W.R.; Biopile Desing, Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon-Contaminated Soils., Battelle Press, Ohio, USA, 1998

ATENUACIÓN SÍSMICA EN EL SEGMENTO DE SUBDUCCIÓN HORIZONTAL PAMPEANO

Maugeri M.[a], Badi G.[a], Manassero M C.[a], Casas J A.[a,b], Sabbione N.[a], Ibáñez Godoy J.[c]

[a] *FCAGLP, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, ARGENTINA*
[b] *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*
[c] *Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, Granada, ESPAÑA*

e-mail: maugeri.micaela@gmail.com

RESUMEN

La actividad sísmica de mayor intensidad en nuestro país se concentra principalmente entre los 27°S y 33°S, sobre el segmento de subducción horizontal pampeano. Resultados obtenidos desde las más variadas disciplinas se integran a fin de entender la compleja geodinámica de esta región. En particular, los estudios de atenuación sísmica proveen además información útil para el modelado litosférico, el estudio de los mecanismos de fuente sismogénica y la evaluación de la peligrosidad sísmica. El efecto de la atenuación puede determinarse mediante el análisis de las pérdidas y redistribuciones de energía en los sismogramas registrados a diferentes distancias y suele representarse por la función disipativa o su inversa, el factor de calidad del medio; Q. Este factor está inversamente relacionado con el grado de heterogeneidad del medio y es muy sensible a sus condiciones viscoelásticas, temperatura, rigidez y presencia de fluidos.
En esta oportunidad se analizan registros de más de 60 estaciones temporales instaladas por los proyectos CHARGE (2000-2002) y SIEMBRA (2007-2009). La localización conjunta de hipocentros sumada al uso de un modelo de velocidades local permite mejorar el detalle de la geometría de la subducción. Se estiman los factores de atenuación en función de la frecuencia para ondas directas P y S mediante el método de las razones espectrales y para ondas coda empleando modelos de scattering simple. El análisis de los resultados en función del tiempo permite regionalizar las variaciones de la reología del medio, identificando los efectos de la anelasticidad y de las heterogeneidades en relación a los procesos asociados a la subducción.

Palabras Clave: Subducción horizontal, atenuación sísmica, ondas P, ondas S, coda

INTRODUCCIÓN

Las señales sismológicas registradas por redes de estaciones temporales y permanentes han permitido esclarecer numerosos aspectos de los complejos procesos asociados al segmento de subducción horizontal pampeano que concentra los terremotos de mayor intensidad en nuestro país. En esta región se han observado diferentes fenómenos tales como variaciones de la velocidad de propagación [1] y de la energía sísmica de las ondas según su camino y anomalías en el flujo del manto [2] que se encuentran íntimamente relacionados con las particularidades de la subducción y dan cuenta de un mayor acople viscoelástico entre placas [3]. La posibilidad de trabajar con datos de eventos registrados por un gran número de estaciones, contando a su vez con un modelo de velocidad específicamente obtenido para esta región brinda una excelente

oportunidad para aumentar la resolución tanto de la geometría de la subducción como de la distribución de los efectos de la atenuación sísmica. En esta ocasión se presentan entonces los factores de atenuación de ondas directas P y S estimados mediante el método de las razones espectrales y de ondas coda empleando modelos de *scattering* simple. Con estos resultados, se podrán observar detalles finos de los efectos de la atenuación sísmica e interpretarlos en relación a los procesos asociados a la subducción, aportando también a los estudios de peligrosidad y riesgo sísmico.

REGIÓN DE ESTUDIO Y DATOS SISMOLÓGICOS

Caracterización

La zona de estudio propuesta para este trabajo se extiende desde los 28ºS hasta los 36ºS y desde los 63ºO hasta los 73ºO, ver Figura 1. La región propuesta está conformada por las provincias del centro-oeste argentino: La Rioja, San Juan, San Luis y Mendoza, que se destacan por tener un relieve altamente montañoso hacia el oeste, cuya principal manifestación topográfica es la Cordillera de los Andes.

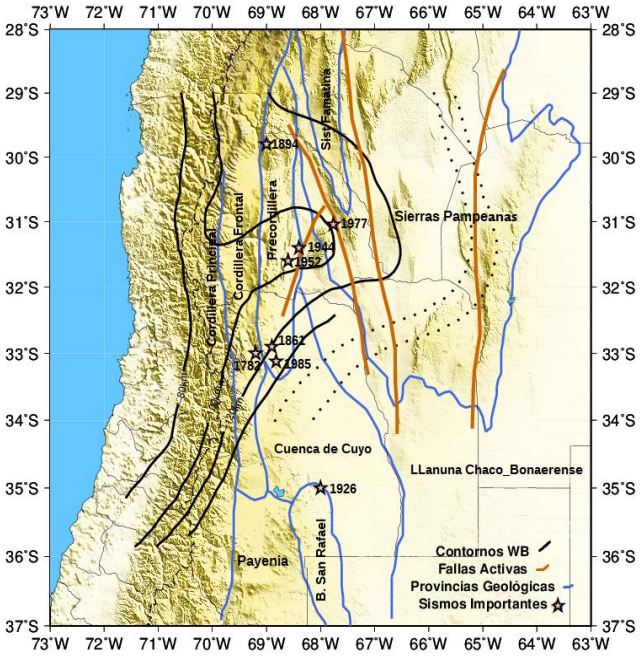


Figura1: Región de estudio y su marco tectónico en los Andes Centrales Australes. Provincias geológicas [6], principales fallas activas [16] [17], sismos importantes ocurridos en la región de estudio (INPRES) y contornos de Wadati-Benioff en km [19]. Elaborado con GMT [22].

La convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana junto a sus características particulares en la zona andina de trasarco alrededor de los 31ºS hacen que esta sea una de las regiones con mayor energía sísmica liberada. Esta zona, también conocida como Región de Nuevo Cuyo, ha sido escenario de varios terremotos destructivos entre ellos se destacan los terremotos de San Juan (1944 Ms 7.3, 1952 Ms 6.8 y 1977 Ms 7.4) y Mendoza (1861 Ms 7.0, 1985 Ms 5.9), considerando el evento ocurrido en 1944 como el desastre natural más grande en la historia de la Argentina, ya que devastó la ciudad de San Juan. Esta región es calificada entonces como la de más alta peligrosidad sísmica en la República Argentina [4].
La actividad sísmica intracontinental superficial se extiende hacia el este hasta unos 600 km de distancia de las mayores alturas andinas [5] ya que incluso Córdoba (1934) y San Luis (1936) han sido seriamente afectadas por terremotos superficiales cercanos.
Los datos sismológicos y geológicos muestran que la segmentación latitudinal de la litósfera oceánica bajo los Andes ejerce un control tectónico de primer orden sobre las provincias

geológicas que la componen. Siguiendo la división del territorio argentino en provincias geológicas [6], la región de estudio comprende en su totalidad a la Cordillera Frontal, la Sierra de Famatina y la Precordillera y en parte a la Cordillera Principal, las Sierras Pampeanas, la Llanura Chaco-Bonaerense, la Cuenca de Cuyo, el Bloque de San Rafael y Payenia.

Datos Sismológicos

Los datos utilizados para la realización de este trabajo fueron proporcionados a través de los siguientes proyectos: CHARGE y SIEMBRA, como se describe a continuación:
CHARGE: este proyecto que tuvo lugar durante el periodo 2000-2002, consistió de 22 estaciones sísmicas desplegadas en dos transectas desde la costa chilena adentrándose en territorio argentino a latitudes alrededor de los 30°S y 36°S completando con algunas estaciones intermedias, ver Figura 2. Su objetivo fue el estudio de la transición entre la subducción normal y plana, así como también de la estructura de la región en términos generales.

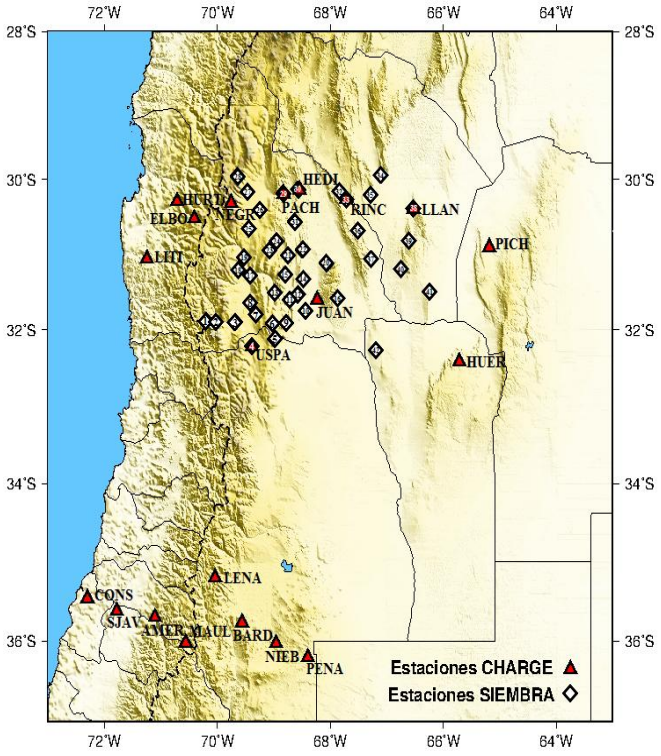


Figura 2: Ubicación de las estaciones utilizadas en el trabajo correspondientes a las Redes temporales CHARGE (triángulos) y SIEMBRA (rombos).

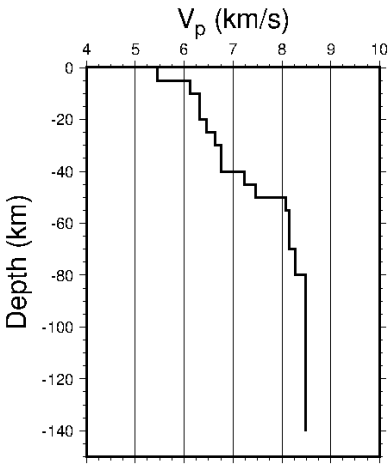


Figura 3: Modelo de velocidad de Scarfi et al. (2012), obtenido para la región de Nuevo Cuyo.

SIEMBRA: este proyecto tuvo lugar en el periodo 2007-2009 dándole continuidad a CHARGE. La red consistió en una grilla de estaciones espaciadas entre 15 y 20 km con tendidos de estaciones más densos en la dirección NE-SW alineados con el eje de la dorsal Juan Fernández, ver Figura 2. Su objetivo fue el estudio de la subducción plana enfocándose principalmente en la provincia de San Juan, la estructura de la corteza y el manto superior y la deformación cortical en la región centro-occidental de Argentina.

LOCALIZACIÓN: IMPLEMETACIÓN

Para proveer una localización preliminar de hipocentros al JHD, se realizó primero una localización de cada evento en forma individual o simple (programa Hypocenter, Seisan) [7]. Para ello debieron convertirse las lecturas obtenidas con los programas de visualización y pre-

procesamiento al formato nórdico requerido por el Seisan. El modelo de velocidad 1D para las ondas P elegido en este trabajo fue el obtenido por [8], ver Figura 3.
Debido a que este modelo solo proporciona valores de $V_{P,}$ se obtuvo la relación de las velocidades (V_P/V_S) a partir diagramas de Wadati [7] construidos mediante la relación:

$$t_S - t_P = \frac{\Delta}{V_P}\left(\frac{V_P}{V_S} - 1\right) = t_P\left(\frac{V_P}{V_S} - 1\right). \quad (1)$$

Para esta región de estudio se obtuvo entonces un valor medio de V_P/V_S = 1.74 con una desviación standard de 0.06 (para todos aquellos eventos registrados por más de 3 estaciones, seleccionando los ajustes lineales con un RMS < 1 y coeficientes de correlación mayores que 0.9). En trabajos anteriores, para algunos sectores dentro de la misma región, se han estimado relaciones de V_P/V_S mayores que dan cuenta de su estado de actividad tectónica al disminuir principalmente la velocidad de las ondas S. Sin embargo, dada la amplia superficie cubierta por la sismicidad aquí considerada es esperable que el valor obtenido se aproxime más al teórico.
La localización simple requiere además contar con parámetros hipocentrales de partida. En el caso de los eventos seleccionados, no se disponía de localizaciones preliminares o si las había, fueron calculadas con otra metodología y modelo de velocidad. Por esto, debió definirse la mejor localización de partida de cada evento a fin de asegurar una buena convergencia del proceso. Una vez obtenidas las soluciones de la localización simple se prepararon los archivos de entrada para la localización conjunta. Teniendo en cuenta la distribución de sismicidad resultante y para lograr una mejor convergencia de los ajustes se procedió a agrupar los eventos según sus profundidades hipocentrales en corticales (eventos con profundidad menor que 50 km) e intermedios (eventos con profundidad mayor que 50 km).
La localización conjunta de hipocentros (JHD) se aplicó mediante el programa Velest implementado en el Seisan [7]. Este programa permite resolver el problema del acople entre la localización conjunta de hipocentros y el modelo de velocidades. En este caso se optó por fijar el modelo de velocidades y realizar en forma conjunta la determinación de hipocentros. Mediante numerosos parámetros, establecidos por el usuario en archivos de texto, se configuraron las condiciones en que el programa se ejecutó en cada iteración. Al fin de cada iteración, contando con nuevos residuos temporales y correcciones de estación, se volvieron a editar los archivos de entrada con el fin de disminuir los residuos temporales y mejorar la correlación de los ajustes logrando una buena convergencia en la solución.

DETERMINACIÓN DE LA ATENUACIÓN EN ONDAS DIRECTAS

A partir de características como el retraso de las ondas en medios con atenuación, la pérdida de contenido en frecuencia o la caída de amplitudes con la distancia o el tiempo de propagación, existen en la bibliografía diversos métodos de determinación de la atenuación sobre ondas P y S en su camino directo desde la fuente a la estación. Dichos métodos pueden implementarse con datos de una única estación, analizando las amplitudes en función de la frecuencia para varios terremotos, o bien para al menos dos estaciones en la misma región y considerando el mismo terremoto.

Método espectral

El Método Espectral [9] analiza el decaimiento del espectro de amplitud del desplazamiento de un terremoto en una estación, con respecto al tiempo de viaje y la frecuencia. En este trabajo se aplica una implementación del método espectral [10], con modificaciones [11], adaptado a su vez a los datos de las redes temporales aquí consideradas.

El método espectral se basa en la observación del espectro de amplitud del desplazamiento producido por las ondas sísmicas y la interpretación del mismo. Si el medio donde se propagan las ondas es elástico, isótropo y homogéneo, el espectro de las ondas generadas en la fuente sismogénica será modificado en su propagación solo por la expansión geométrica. Al llegar a la estación se verá afectado además por la respuesta instrumental. En medios reales deberá considerarse el efecto de absorción espectral del suelo en la propagación y el efecto de sitio en la estación dado que características de la geología local pueden afectar de manera distinta a las ondas registradas según de donde provengan. Si bien este último efecto tanto como la respuesta instrumental pueden estimarse o eliminarse mediante cocientes espectrales, es importante tener en cuenta que la banda de paso del instrumento debe ser lo suficientemente ancha como para no perder componentes del espectro de la señal registrada en el sismograma.
El espectro de amplitud del desplazamiento de las ondas directas de un evento *k* registradas en una estación *j* para una frecuencia f_i puede expresarse entonces de la siguiente manera:

$$A_k(f_i, r_j) = R_k(\theta,\phi) S_k(f_i) G_j(f_i,\theta,\phi) I_j(f_i) r_j^{-1} e^{-\frac{\pi f_i t_j}{Q_i}}, \quad (2)$$

donde $r = \upsilon t$ es la distancia hipocentral, para una velocidad promedio de las ondas, (θ,ϕ) son las coordenadas del punto de observación, $R(\theta,\phi)$ es el patrón de radiación, $S(f)$ es la función fuente, $G(f,\theta,\phi)$ es el efecto de sitio en la estación, $I(f)$ es la respuesta instrumental, r^{-1} aproxima el efecto de la expansión geométrica para ondas de cuerpo y *Q* es el factor de calidad para una dada trayectoria de la onda.
Asumiendo que Q varía suavemente con la frecuencia se divide el espectro de desplazamiento de la señal en intervalos de frecuencia estrechos. Esto permite suponer Q constante entre intervalos sucesivos tomados de a pares.
Realizando el cociente entre la ecuación 2 para una frecuencia f_i y su análoga para la frecuencia f_m se eliminan el patrón de radiación y el efecto de la expansión geométrica, ya que sólo dependen de la ubicación de la estación respecto de la fuente.
Luego, tomando logaritmos naturales, se llega a:

$$\ln \frac{A_k(f_i, r_j)}{A_k(f_m, r_j)} = \ln \frac{S_k(f_i)}{S_k(f_m)} + \ln \frac{G_j(f_i,\theta,\phi)}{G_j(f_m,\theta,\phi)} - \pi\left(\frac{f_i}{Q_i} - \frac{f_m}{Q_m}\right) t_j \quad (3)$$

En este trabajo se realizarán los cocientes de amplitudes espectrales entre intervalos consecutivos de frecuencias (f_i, f_{i-1}) considerando un factor de calidad constante entre las mismas $Q_i = Q_m$. De este modo cada pendiente permitirá estimar el valor de Q para las frecuencias consideradas en el cociente. Este valor se asigna a la trayectoria entre el epicentro promedio y la estación.

DETERMINACIÓN DE LA ATENUACIÓN EN ONDAS CODA

Modelo de scattering isótropo simple

El modelo de *scattering* isótropo simple [12] es una extensión del *Single Back Scattering* (SBS) [13] adaptado para el caso en que la distancia fuente-receptor no fuera despreciable y el *scattering* fuera isótropo. Es decir, donde la energía elástica se propaga en frentes esféricos desde una fuente puntual a través de un medio elástico tridimensional e infinito donde hay numerosas heterogeneidades distribuidas homogénea y aleatoriamente, dando origen al modelo de *Single Isotropic Scattering* (SIS).

La siguiente expresión representa la envolvente de la amplitud de la coda de un sismograma a una dada frecuencia *f y* lapso de tiempo t:

$$A(f,t) = A_0(f)t^{-m}K(\nu)^{\frac{1}{2}}e^{-\frac{\pi f t}{Q_c}} \tag{4}$$

donde *t* es el lapso de tiempo o el intervalo de tiempo desde el origen del evento hasta el instante que se mide la amplitud de la coda; $A_0(f)$ reúne los efectos del patrón de radiación y el efecto de sitio; t^{-m} es la expansión geométrica de las ondas coda; *m*, el factor de divergencia geométrica, puede seleccionarse entre 1 y 0.5 según se considere a la coda como compuesta por ondas S dispersadas u ondas superficiales respectivamente; Q_c es el factor de calidad del medio que tiene en cuenta la atenuación total y $K(\nu)$, el factor de corrección por expansión geométrica para el scattering isótropo, define una cáscara isócrona de *scattering* para un lapso de tiempo dado definido como:

$$K(\nu) = \frac{1}{\nu}\ln\frac{\nu+1}{\nu-1} \quad \text{para } \nu>1$$
$$\nu = vt/r = cte \tag{5}$$

El modelo SBS [13] sólo representaba bien las condiciones reales para tiempos de propagación superiores a dos veces el tiempo de propagación de la onda S. En cambio el modelo SIS [12], al considerar fuentes y receptores no coincidentes, permite realizar el análisis de la coda inmediatamente tras la llegada de la onda S.
Del mismo modo que en Método Espectral puede ajustarse la variación de Q con la frecuencia mediante la expresión:

$$Q = Q_o\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\alpha} \tag{6}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Localización

En la Figura 4 se presenta la distribución de epicentros obtenidos combinando los resultados de las dos redes temporales. Los puntos rojos muestran los epicentros corticales, que en la provincia de San Juan se concentran principalmente en Sierra Pie de Palo y en un claro alineamiento a lo largo de los valles de Matagusanos y Ullum-Zonda, al oeste del límite este de Precordillera Oriental tal como observaron [14] [15]. En el centro norte de la provincia de Mendoza la localización conjunta permitió delinear claramente las fallas que limitan al anticlinal Barrancas o inclusive a la falla La Cal, responsables estas de los terremotos de mayor magnitud registrados en el terreno de Cuyania [16]. Los hipocentros corticales en la provincia de Córdoba se asocian a las estructuras de las Sierras Pampeanas Orientales [6] [17] mientras que en la provincia de Catamarca, en el terreno Pampia, se encuentran principalmente en las estructuras asociadas a las sierras de Ambato [6] [17]. En la provincia de La Rioja, en el terreno Pampia, los hipocentros pueden asociarse a las estructuras pertenecientes a la Sierras de Velasco-Aimogasta-Mazán [6].
Por otro lado, en la costa de Chile se distribuyen en una alineación paralela a la fosa y principalmente en el inicio de la subducción de la dorsal Juan Fernández.

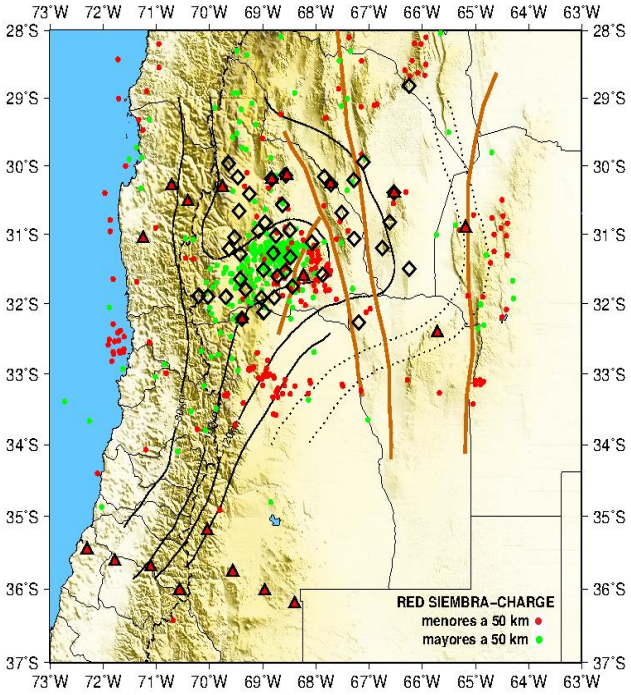


Figura 4: Distribución de epicentros en planta combinando los resultados de las redes temporales. Se diferencia en rojo los eventos corticales (h<50 km) y en verde los eventos intermedios (h>50 km).

Las suturas planteadas por Ramos et al. (2002) [18] delimitan la actividad sísmica cortical demostrando que las viejas discontinuidades corticales juegan un rol importante en la concepción y la geometría de las fallas activas principales.

Los sismos a profundidades intermedias mantienen su mayor concentración al sur de los 31ºS pero se observa un claro alineamiento de los mismos en dirección ENE. Esta direccionalidad de la zona de mayor fragilidad en la placa de Nazca coincide con la prolongación bajo el continente de la dorsal Juan Fernández como ya había sido observado [19] [20].

En la Figura 5 se presentan secciones verticales para intervalos de latitud indicados con los hipocentros obtenidos de la localización conjunta (puntos azules, red CHARGE) y de catálogo (puntos rojos, red SIEMBRA). La combinación de los datos de ambas redes permite delimitar zonas sismogénicas corticales que se nuclean en torno a los diferentes rasgos tectónicos conocidos.

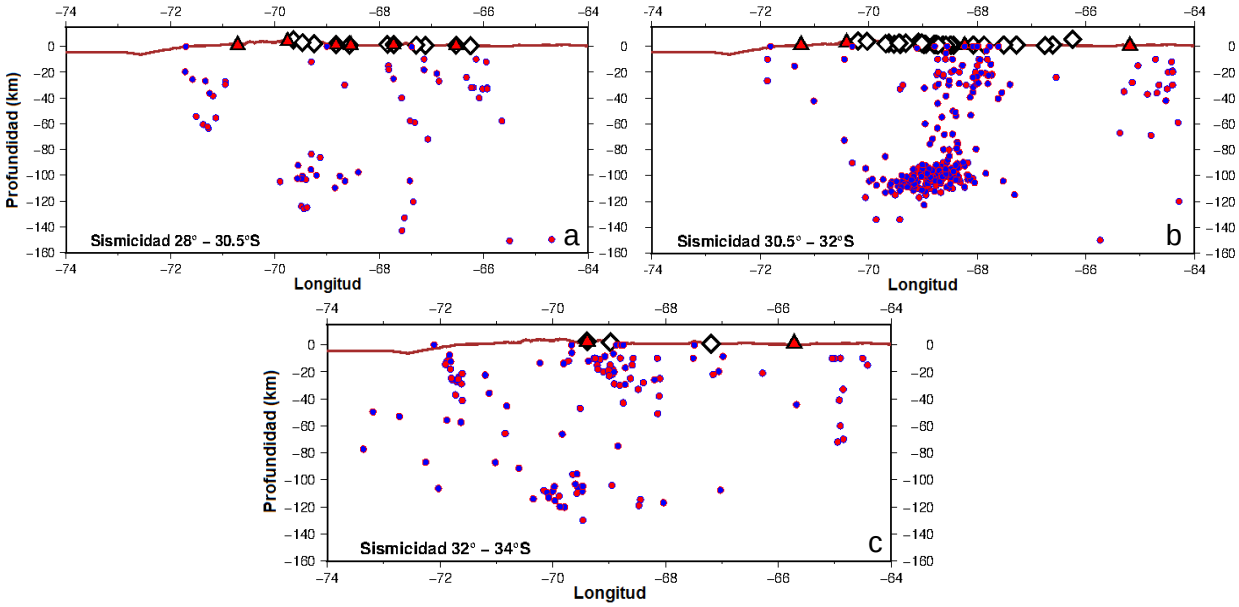


Figura 5: El eje vertical muestra la profundidad focal en km y el eje horizontal corresponde a la longitud en grados. En cada caso se indica el intervalo de latitud analizado. Las estaciones ubicadas en el área se indican con triángulos (CHARGE) y rombos (SIEMBRA). Se diferencian en azul los eventos correspondientes a CHARGE y en rojo a SIEMBRA.

Podemos determinar dos grupos de eventos, uno que se concentra principalmente en corteza y otro que se ubica en la placa de Nazca delineando su subducción. Siendo para el caso de la red CHARGE mejor caracterizada la zona de subducción horizontal al observarse una menor dispersión de los hipocentros si comparamos los resultados obtenidos con SIEMBRA. Esto puede ser atribuido al uso de diferentes catálogos y técnicas de localización.
Se observa que la mayor sismicidad se concentra en el intervalo [30.5ºS-32ºS]. Para el caso de los eventos intermedios puede apreciarse una pendiente de la zona de Wadati Benioff hacia el oeste en ese intervalo a longitudes [68ºO-70ºO] tal como habían observado otros autores [19] [20]. Las profundidades promedio de la zona frágil en la placa de Nazca se encuentran aquí entre 80 y 120 km, mientras que la mayoría de los eventos corticales se encuentra por encima de los 40 km de profundidad.

Atenuación de ondas directas: Método espectral

Se han confeccionado mapas de Q_o espectral para los eventos corticales e intermedios según resultados obtenidos para las fases P y S. Estos se realizaron ajustando una superficie cartesiana 2D mediante interpolación a trozos (*splines*) con funciones de Green utilizando GMT [22].

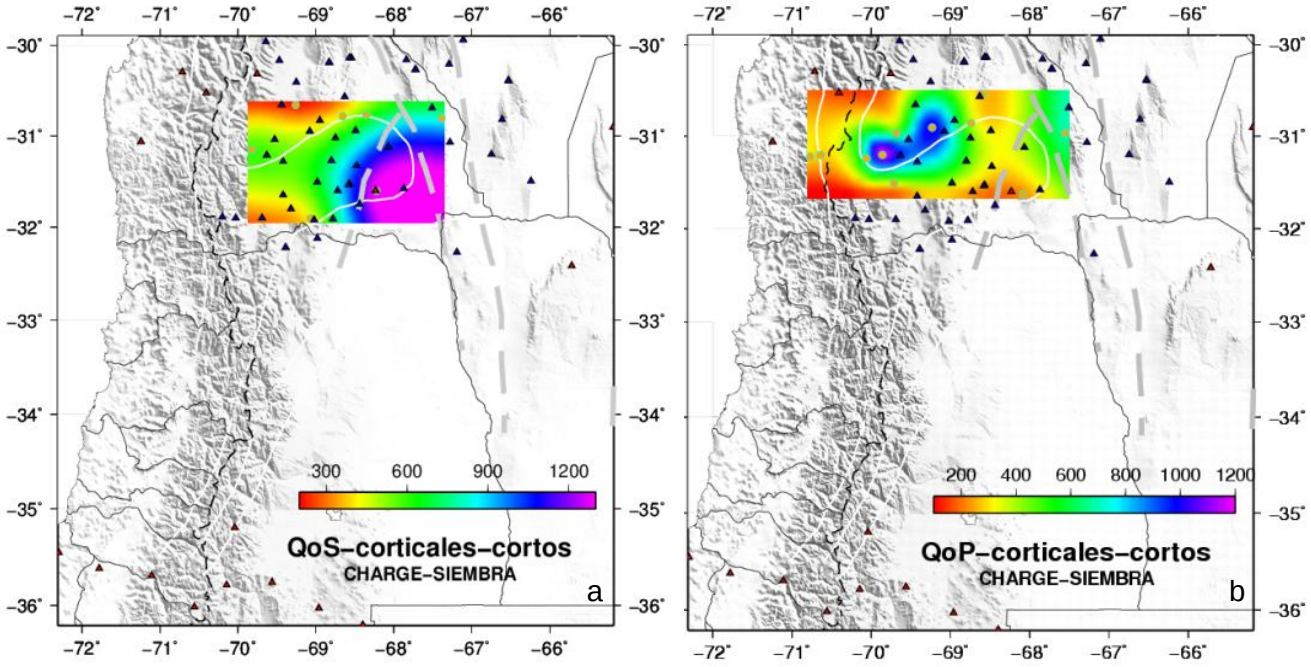


Figura 6: *Resultados obtenidos con el método espectral en el caso de los eventos corticales para las fases P y S con tiempos de viaje cortos (cortas distancias epicentrales). La superficie de* Q_o *se ajusta dentro del área ocupada por epicentros y estaciones.*

En general, se observa que, los valores de Q_o obtenidos resultan altos con respecto a los valores esperados para una región de intensa actividad tectónica. Los valores más bajos encontrados fueron ajustados para los intervalos de tiempo más cortos, es decir, para las menores distancias epicentrales consideradas. Este comportamiento justificaría que los valores de α indiquen en general una débil dependencia de Q con la frecuencia [20]. Para el caso de los eventos intermedios se observan contraposiciones para localizaciones cercanas lo que inhabilita la construcción de una superficie fácil de interpretar. Se propone entonces, para este caso, un análisis con una cantidad mayor de trayectorias.
Para el caso de los eventos corticales, ver Figura 6, si bien el área abarcada por los resultados es bastante estrecha, se observa que se mantienen la contraposición de máximos y mínimos de

atenuación observada por [10] [21]. Se puede advertir además que el mínimo de atenuación en el caso de la fase P (coincidente con el máximo observado para el caso de la fase S) se encuentra al norte de la inflexión de la placa. Por otro lado el máximo de atenuación en el caso de la fase P (coincidente con el mínimo observado para el caso de la fase S) puede asociarse con la zona de mayor actividad sísmica cortical. Dado el número y la distribución de los sismos analizados no se pueden ver mar detalles en estos resultados. La complejidad tectónica de la región a la que caracterizan estos resultados podría ser la responsable de este comportamiento el que podría estar relacionado con la presencia de fluidos [21].
Se propone entonces aumentar el número de trayectorias para de esta manera mejorar los ajustes o implementar otras técnicas de determinación del factor de calidad de ondas directas como aquellas basadas en la comparación estadística de las formas de onda en el dominio del tiempo.

Atenuación de ondas coda: modelo de scattering isótropo simple

Se confeccionaron mapas utilizando GMT [22] ajustando una superficie cartesiana 2D mediante interpolación a trozos (*splines*) con funciones de Green. En la Figura 7 se representan las desviaciones de la atenuación respecto de su mediana para eventos corticales y lapsos de tiempo de 60 y 90s mientras que en la Figura 8 se presentan las desviaciones para eventos intermedios en los mismos lapsos de tiempo.
Dadas las profundiades alcanzadas por las trayectorias de las ondas dispersadas, ver Figura 7a, podría estar representando la atenuación en la litosfera continental y litosfera océanica incluso también en la porción del manto inmediatamente debajo de la laja. Aquí puede observarse que los límites entre las zonas de mayor y menor atenuación aproximan el contorno de Wadati Benioff a los 100 km con un incremento de la atenuación hacia el Noreste como han observado otros autores. Cabe destacar que el comportamiento se asemeja bastante a los obtenidos con el Método Espectral para el caso de eventos corticales en la fase S. Esto último resulta lógico porque refuerza la hipótesis de que las ondas coda contienen ondas S dispersadas.
A medida que incrementamos la profundidad, ver Figura 7b, se intensifican los máximos y mínimos donde la atenuación sigue mostrando un incremento en la dirección y sentido de avance de la subducción de la dorsal. Se observa que la menor atenuación permanece asociada a la dorsal mientras que la mayor atenuación se encuentra al frente de la misma limitada por el contorno de Wadatti Benioff a los 100 km.

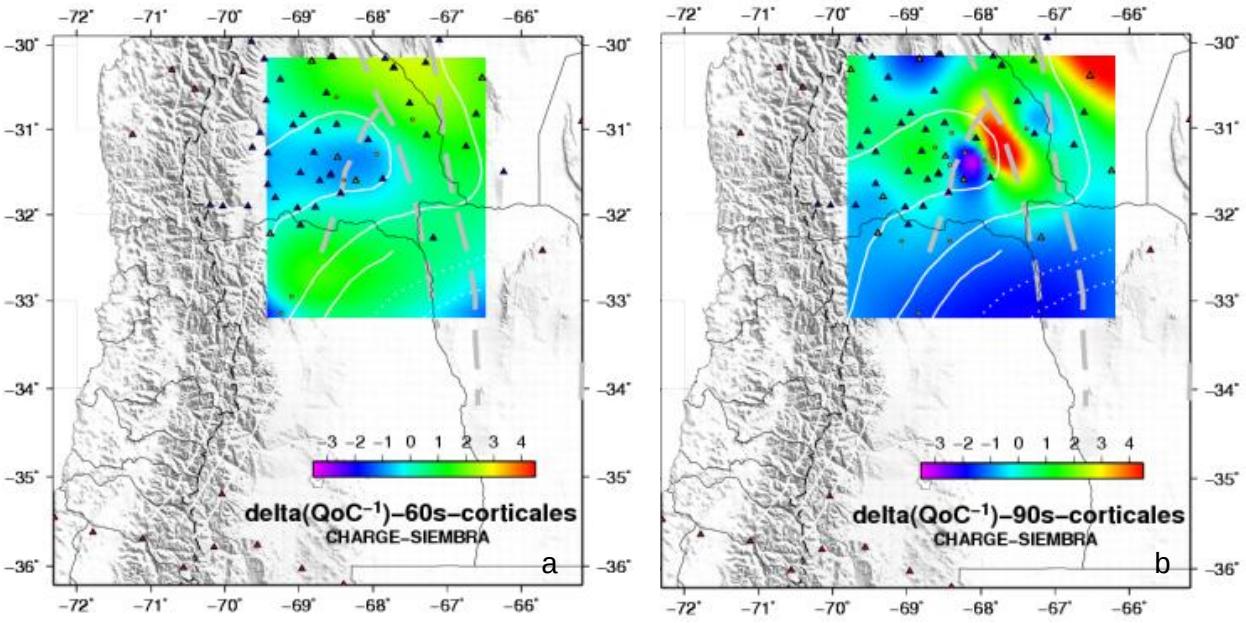


Figura 7: Resultados obtenidos con el modelo de scattering isótropo simple para eventos corticales y lapsos de tiempo de 60 y 90 segundos.

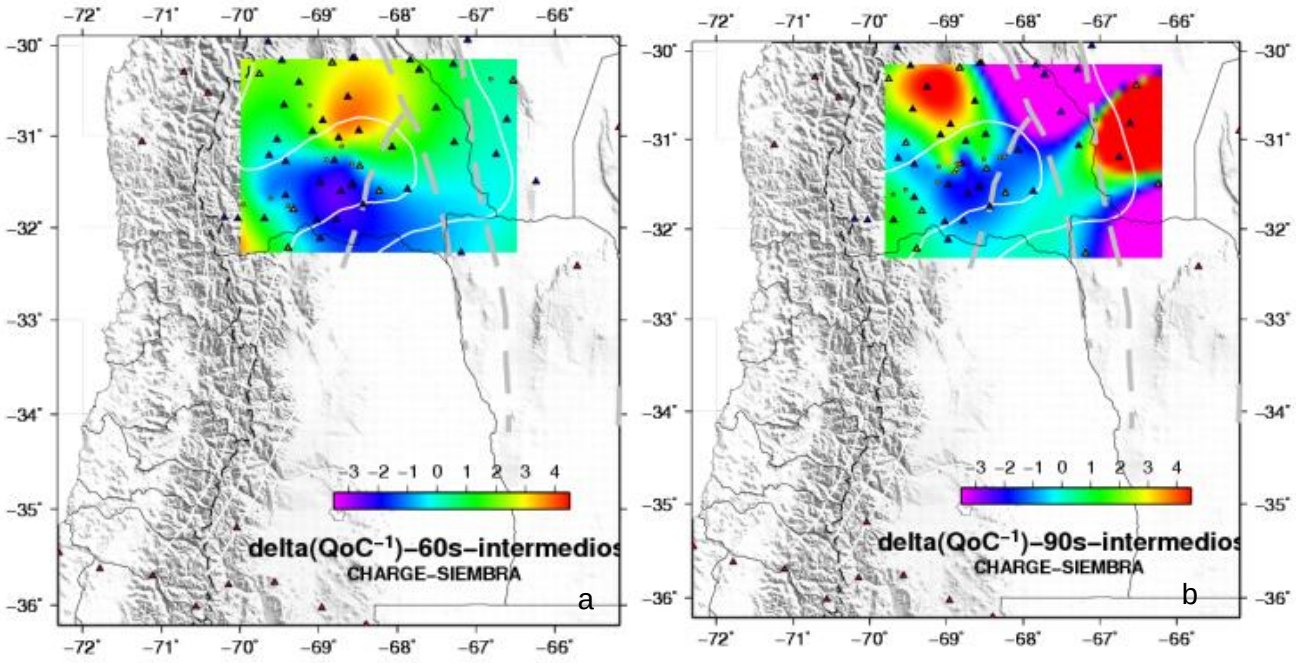


Figura 8: Resultados obtenidos con el modelo de scattering isótropo simple para eventos intermedios y lapsos de tiempo de 60 y 90 segundos.

CONCLUSIONES

Localización de hipocentros

La localización conjunta permitió una caracterización más precisa de la zona de subducción horizontal. Las distribuciones de focos en planta y profundidad delimitan zonas sismogénicas que coinciden con las estructuras geológicas conocidas como activas en la región.

Se propone analizar un mayor número de datos (detección automática de eventos y localización conjunta).

Atenuación de ondas P y S

Se observó una gran dependencia de la atenuación con la tectónica regional. Es notable la asociación de las anomalías de atenuación con las áreas de mayor actividad sísmica y con la geometría de la subducción, en particular en el contorno de los 100 km.

Los valores de Q obtenidos resultan altos con respecto a los valores esperados para una región de intensa actividad tectónica.

Se propone entonces aumentar el número de trayectorias estudiadas e implementar otras técnicas para el estudio de la atenuación de ondas directas como aquellas basadas en la estimación de la función de respuesta del suelo.

Atenuación de ondas coda

Se observó una buena correlación de resultados entre eventos corticales e intermedios para los mismos volúmenes muestreados por las codas. A medida que se incrementa la profundidad se intensifican los máximos y mínimos mostrando siempre un incremento de la atenuación en la dirección y sentido de avance de la subducción de la JFR sobre la placa de Nazca. Se observó que la menor atenuación permanece asociada a la dorsal mientras que la mayor atenuación se encuentra al frente de la misma limitada por el contorno de Wadatti Benioff a los 100km.

Sería recomendable densificar la información en profundidad, realizar una tomografía de atenuación y comparar los resultados con aquellos de otras disciplinas para dar respuesta a algunos de los interrogantes que aún quedan.

REFERENCIAS

[1] Deshayes, P., T. Monfret, M. Pardo and E. Vera., 2008 Three-dimensional P- and S-wave seismic attenuation models in central Chile - western Argentina (30°-34°S) from local recorded earthquakes.7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts: 184-187.

[2] Triep, E. y C. B. de Cardinali, 1984. Mecanismos de sismos en las Sierras Pampeanas Occidentales. Actas del Noveno Congreso Geológico Argentino, III, 61-80.

[3] Alvarado P., Sánchez G., Saez M. y Castro de Machuca B., 2010. Nuevas evidencias de la actividad sísmica del terreno Cuyania en la región de subducción de placa horizontal de Argentina. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 27, núm. 2, 2010, p. 278-291.

[4] Giardini, D., G. Grünthal, K. Shedlock and P. Zhang, 1999. Global Seismic Hazard Map in The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. D. Giardini, ed. Annali di Geofisica 42, 6, 1230 pp.

[5] Alvarado, P.M., S. Beck, G. Zandt, M. Araujo and E. Triep, 2005. Crustal deformation in the southcentra lAndes backarc terranes as viewed from regional broad-band seismic waveform modelling. Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02759.x.

[6] Ramos, V.A., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires. Anales 29(3), 41-96.

[7] Havskov J. and L. Ottemöller, 2008. SEISAN: the earthquake analysis software for windows, solaris,linux and macosx. Version 8.2.1. University of Bergen, Norway, British Geological Survey,UK.

[8] Scarfi, Luciano; R. Raffaele,G. Badi, J. Ibáñez, S. Imposa, 2012b. Seismicity and Crustal Velocity Structure of the Southern Central Andes – Western Argentina. EAGE, Saint Petersburg 2012 – Geosciences: Making the most of the Earth's resources. San Petersburgo, Rusia, 02 al 05 de abril de 2012.

[9] Tsujiura, M., 1966. Frequency analysis of seismic waves: 1. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.44, 873-891.

[10] Rojas Arce, D.N., 2013. Atenuación Sísmica Espectral de ondas P y S: una nueva metodología, y sus resultados para la Región de Nuevo Cuyo. Tesis de grado en Geofísica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.

[11] Manassero, M.C., 2015. Estudios de atenuación sísmica en el área del volcán peteroa Tesis de grado en Geofísica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.

[12] Sato, H., 1977. Energy propagation including scattering effects-single isotropic scattering approximation. J. Phys. Earth 25, 27-41.

[13] Aki, K. and B. Chouet, 1975. Origin of Coda Waves: Source, Attenuation and Scattering Effects. J. Geophys. Res. 80, 23, 3322-3342.

[14] Pujol, J., J. M. Chiu, R. Smalley Jr., M. Regnier, B. Isacks, J.L. Chatelain, J. Vlasity, J. Castano and N. Puebla, 1991. Lateral velocity variations in the andean foreland in Argentina determined with the JHD method. Bull. Seism. Soc. Am. 81, 2441-2457.

[15] Siame, L., O. Bellier and M. Sebrier, 2006. Active tectonics in the Argentine Precordillera andWestern Sierras Pampeanas. Rev. Asoc. Geol. Arg. 61 (4), 604-619.

[16] Cortés, J. M., P. Vinciguerra, M. Yamín and M. M. Pasini, 1999. Tectónica cuaternaria de la región andina del Nuevo Cuyo (28° - 38° LS). En: Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires. Anales 29 (24), 760-778.

[17] Costa, C. H., 1999. Tectónica Cuaternaria en las Sierras Pampeanas. En Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires.Anales 29 (24), 779-784.
[18] Ramos, V. A., E. O. Cristallini and D. J. Pérez, 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. J. South Am. Earth Sciences 15, 59-78.
[19] Anderson, M., P. Alvarado, G. Zandt, S.L. Beck, 2007, Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca plate, central Chile and Argentina, Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03483.x, 2007.
[20] Badi, G. A., 2011. Atenuación sísmica en la Región de Nuevo Cuyo. Tesis doctoral. Facultad de Cs.Astron. Y Geofísicas, UNLP, Argentina, http://sedici.unlp.edu.ar/ARG-UNLP-TPG-0000002966.
[21] Badi, G.A., D. Rojas Arce, M. Maugeri, M.C. Manassero, J.A. Casas, N. Sabbione, J. Ibáñez Godoy, 2014. Atenuación sísmica espectral de ondas directas: una nueva metodología, y sus resultados para la región de Nuevo Cuyo. Actas del XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, Argentina, S20-24, en CD, ISBN 978-987-22403-5-6.
[22] Wessel, P., and W. H. F. Smith, 2013, The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.5.9 Technical Reference & Cookbook, SOEST/NOAA.

ESS-IM: INCREMENTO EN CALIDAD DE PREDICCIÓN MEDIANTE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EVOLUTIVOS

Méndez-Garabetti M.A.[a,b,c], *Bianchini G.*[a], *Caymes-Scutari P.*[a,b] *y Tardivo M.L.*[a,b,d]

[a]*Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido (LICPaD). Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional,*
Rodriguez 273, Mendoza, Argentina.
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.*
[c]*Instituto Tecnológico Universitario, Universidad Nacional de Cuyo,*
Centro Universitario, Mendoza, Argentina
[d]*Departamento de Computación, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nac. 36, Km. 601, Córdoba, Argentina.*

*e-mail:*mmendez@itu.uncu.edu.ar

RESUMEN

Anualmente, los incendios forestales consumen aproximadamente dos millones de hectáreas de forestación alrededor del mundo, causando diversas pérdidas desde el punto de vista ambiental, económico y humano. Sin duda, esto convierte a los incendios forestales en uno de los fenómenos naturales más perjudiciales de la actualidad. Con el objetivo de reducir los efectos negativos causados por este tipo de fenómenos, continuamente se desarrollan estrategias y herramientas para la prevención, monitoreo y/o predicción de incendios. Los sistemas de predicción suelen ver afectada su calidad de predicción debido a la existencia de incertidumbre en los datos de entrada (generalmente por dificultades para cuantificar los valores en tiempo real). Ante esta situación los métodos de reducción de incertidumbre permiten contrarrestar dichos efectos mejorando la calidad de predicción por medio de diferentes técnicas y estrategias. Tal es el caso del Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas (ESS-IM), el cual es un método de reducción de incertidumbre que ha sido aplicado satisfactoriamente en la predicción del comportamiento de incendios forestales. ESS-IM utiliza Computación de Alto Rendimiento, Análisis Estadístico y Algoritmos Evolutivos Paralelos (AEP). Los AEP pertenecen al conjunto de técnicas de optimización conocidas como Metaheurísticas, las cuales poseen ciertos parámetros de configuración inicial, que determinan el modo de operar del algoritmo. Es importante realizar una correcta elección de los valores de estos parámetros ya que de ellos depende el comportamiento de la estrategia para la búsqueda de nuevas soluciones, lo que impacta drásticamente en la calidad de los resultados del método (en este caso, la calidad de predicción). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consiste en desarrollar un análisis de sintonización de sus parámetros evolutivos que permitan incrementar la calidad de predicción de ESS-IM.

Palabras Clave: Incendios Forestales, Predicción, Sintonización, Algoritmos Evolutivos, Modelo de Islas.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son uno de los fenómenos que más perjudican a los ecosistemas alrededor de todo el mundo, éstos causan importantes pérdidas económicas y materiales. Si bien ciertas condiciones naturales como: la deshidratación en la vegetación, largos periodos de sequía, bajos índices de humedad y altos valores de temperatura, favorecen la generación de incendios, la mayoría ocurren debido a accidentes humanos o deliberadamente planificados. A modo de ejemplo, se puede mencionar el incendio forestal ocurrido en enero de 2016, en el Parque Nacional Los Alerces provincia de Chubut, Argentina (Figura 1), donde se consumieron más de 1600 hectáreas de bosques nativos [1]. Dicho incendio provocó daños irreversibles en la flora y fauna autóctona del lugar.

Si bien es importante identificar las causas que originan los incendios, también es de interés conocer los factores que propician su propagación, como la velocidad del viento, el combustible, el tipo de vegetación, la topografía del terreno, entre otros. En este contexto, no solo importa trabajar en campañas de prevención, sino también en el desarrollo de herramientas o métodos que ayuden en la toma de decisiones a la hora de combatir los incendios forestales. Tal es el caso de las técnicas que permiten pronosticar el comportamiento del fuego una vez iniciado el incendio.

El comportamiento de un incendio forestal depende de diversos factores, desde el clima, la topografía del terreno, el tipo de vegetación (combustible), entre otros. Por lo general, al momento de realizar la predicción de un incendio forestal, se presenta cierta dificultad para determinar los valores de las variables que determinan el comportamiento del mismo. Debido a esto, las predicciones realizadas mediante técnicas clásicas, no suelen brindar resultados de calidad, por lo que es necesario recurrir a métodos que permitan minimizar la falta de precisión o incertidumbre en la entrada del sistema. Tal es el caso del Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas (ESS-IM) [2,3], el cual es un método general de reducción de incertidumbre, que ha sido aplicado con éxito en la predicción del comportamiento de incendios forestales. ESS-IM utiliza Algoritmos Evolutivos Paralelos [4] (AEPs), como herramienta de optimización, con un esquema de paralelización multipoblacional basado en islas y técnicas de sintonización estática [5].

Los AEPs poseen diferentes parámetros de configuración que determinan el modo en que el algoritmo operará en busca de buenas soluciones. En el presente trabajo se presenta un estudio de optimización de los parámetros evolutivos de migración de ESS-IM, ya que al operar el método con una configuración óptima de parámetros, es posible alcanzar resultados de mejor calidad, lo que equivale a obtener predicciones más cercanas a la realidad. Además, es importante mencionar que ESS-IM opera en un ambiente de computación de alto rendimiento, donde una configuración óptima de parámetros puede permitir realizar una utilización de recursos más eficiente.

En la siguiente sección se provee una breve explicación de los EAs y los AEPs. Posteriormente se comenta la técnica de sintonización utilizada, junto con los parámetros evolutivos evaluados. A continuación se proporciona una descripción del funcionamiento del método ESS-IM. Seguidamente se brindan los detalles de los experimentos realizados, se describe el entorno de trabajo, y a continuación se exponen los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.



Figura 1: Incendio forestal en Parque Nacional los Alerces, Chubut, Argentina (enero de 2016).

ALGORTIMOS EVOLUTIVOS

La metaheurística conocida como Algoritmos Evolutivos (EAs), es un método búsqueda inspirado en la teoría de la evolución biológica de Darwin [6], para la resolución de problemas de optimización [7]. El algoritmo consiste en un proceso basado en iteraciones, las cuales se denominan generaciones evolutivas. Esta metaheurística agrupa las posibles soluciones en un conjunto llamado población, donde cada solución se representa por un individuo. Dicha población evoluciona, de generación en generación, imitando los principios de selección natural y supervivencia, esperando que se llegue a una solución aceptable para el problema tratado. Es importante mencionar que cada individuo posee un valor de aptitud, el cual determina la calidad de dicha solución para el problema tratado. Este valor es calculado mediante la función matemática que describe el problema, y juega un rol fundamental ya que permite caracterizar a los individuos según sus capacidades. De esta manera, aquellos individuos con mejor aptitud, deben tener mayor probabilidad de sobrevivir, de no ser reemplazados, de reproducirse, y así dejar sus rasgos hereditarios a las generaciones futuras [8].

En la Figura 2, se puede observar un esquema básico de un AE, donde *g* identifica el número de generaciones y *Pob(g)* representa la población de individuos en la g-ésima generación. Para cada iteración *g*, se selecciona un grupo de individuos de la población actual *Pob(g)*, donde se garantiza que las buenas soluciones tengan mayor probabilidad de ser elegidas. Posteriormente, sobre este subconjunto de individuos, se aplican los operadores evolutivos (cruzamiento, mutación y reemplazo), que imitan el proceso de adaptación natural.

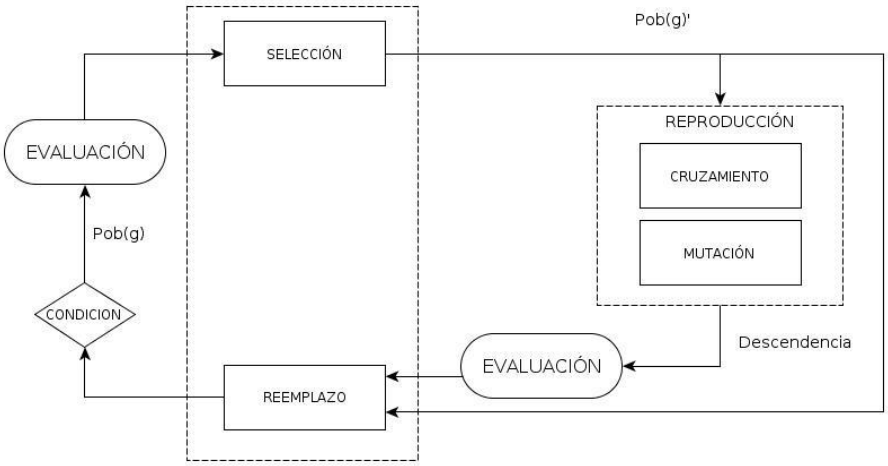


Figura 2: Esquema general del funcionamiento de un AE.

El operador de selección elige cierta cantidad de individuos, los cuales serán los progenitores de la nueva generación. Posteriormente éstos son sometidos al proceso de reproducción, para generar los nuevos individuos. Existen dos operadores de reproducción, por un lado el operador de cruzamiento, el cual actúa sobre pares de individuos creando otro par de individuos descendientes. Y por otro, el operador de mutación, el cual actúa sobre un solo individuo. La mutación introduce cierto grado de diversidad, con el objetivo explorar de forma más eficiente el espacio de búsqueda.
Por último, se realza el reemplazo, proceso que consiste en sobrescribir ciertos individuos de la población actual en con la descendencia. Una estrategia consiste en reemplazar de forma inmediata los progenitores con los descendientes, otra opción puede ser reemplazar aquellos individuos de la población que posean características más similares a los descendientes, o reemplazar aquellos individuos que posean los peores valores de fitness.

Algoritmos Evolutivos Paralelos

Cuando un AE es utilizado para resolver problemas de alta complejidad, i.e., muy demandantes de tiempo o recursos, éstos suelen ser implementados de forma paralela para ser ejecutados en sistemas de computación de alto desempeño o HPC [9]. La paralelización divide la carga de trabajo en *N* unidades de cómputo, reduciendo el tiempo de procesamiento. Al igual que los AE, los AEP se basan en el concepto de supervivencia, el cual permite eliminar de la población aquellos rasgos perjudiciales y garantizar la permanencia de las mejores características en las futuras generaciones.
Los AEP pueden ser clasificados en función de diferentes criterios: según la cantidad de poblaciones involucradas, el tratamiento de los operadores, la relación cómputo/comunicación, entre otros. En [10], los AEPs se dividen en: paralelismo automático a nivel del compilador, master/worker con única población y evaluación en paralelo, paralelismo de grano grueso, distribuido o basado en islas (múltiples poblaciones) y de grano fino o masivamente paralelo. En [11], la clasificación de los

mismos se divide en: modelo master-slave, modelo de islas, modelo celular y modelo jerárquico.
En ESS-IM, se utiliza un esquema de paralelización híbrido basado en islas con doble jerarquía master-worker (Figura 3). En esta estrategia de paralelización se opera con múltiples poblaciones, también llamadas islas. Aquí los operadores evolutivos son aplicados entre individuos de la misma isla. Con el objetivo de que las islas no evolucionen de forma independiente, se introduce un operador de migración. La migración agrega diversidad y disminuye la probabilidad de convergencia prematura mediante el intercambio de individuos entre las diferentes islas.

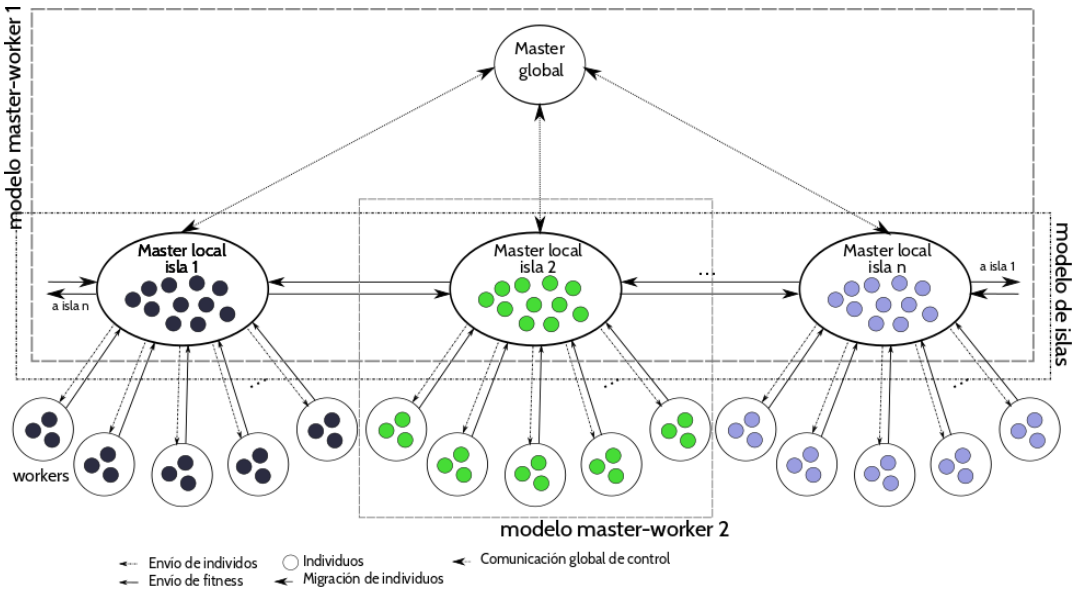


Figura 3: Esquema de paralelización híbrido basado en islas con doble jerarquía master-worker.

SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS

Toda metaheurística posee ciertos parámetros de configuración inicial, los cuales determinan aspectos fundamentales sobre el funcionamiento interno del algoritmo. Seleccionar de forma correcta dichos valores no es una tarea sencilla, ya que no existe una configuración óptima y universal de parámetros, y además, éstos suelen ser dependientes de las características del problema. Para obtener una configuración óptima de éstos parámetros, se necesita someter el algoritmo a un proceso de análisis y ajuste denominado calibración o sintonización [5].
La calibración de parámetros puede realizarse de forma off-line u online. La primera, consiste en determinar valores fijos para cada parámetro antes de ejecutar la metaheurística. Para relevar los resultados, se define un conjunto de experimentos a realizar con diferentes configuraciones de parámetros, se analizan los resultados obtenidos y se obtiene la mejor configuración. La segunda técnica consiste en

determinar los valores de los parámetros de manera dinámica, mientras la metaheurística se encuentra en funcionamiento [5]. En este trabajo se ha realizado una calibración de parámetros off-line o estática.

Parámetros Evolutivos

Si bien los AEPs poseen diferentes parámetros que configuran su funcionamiento, la calibración debe ser limitada sólo a aquellos sobre los que se tenga interés de optimizar. En este trabajo, se ha seleccionado un subconjunto de parámetros, los cuales están relacionados con la función de migración de individuos:

1. **Criterio migración**: Este parámetro indica la forma en que serán seleccionados los individuos que migrarán, también indica qué va a ocurrir con los nuevos individuos que se incorporen de otras poblaciones.
   Elitista: los mejores individuos reemplazan los peores, semi-elitista: el 50% de los individuos enviados corresponden a los mejores y el otro 50% se escoge de forma aleatoria –el reemplazo sigue el mismo criterio-, aleatorio: los individuos son seleccionados y reemplazados al azar).

2. **Cantidad de individuos a migrar**: Determina el número de individuos que deben ser migrados hacia las islas vecinas al producirse una migración.

3. **Frecuencia de migración**: Establece cuando ocurre la migración, una configuración habitual suele ser en función del número de iteraciones. Es importante tener en cuenta que la migración introduce una sobrecarga de comunicación, por lo que éste parámetro se debe determinar cuidadosamente.

METODOLOGÍA DE FUNCIONAMIENTO DE ESS-IM

Tal como se comentó anteriormente, ESS-IM es un método de reducción de incertidumbre basado en Algoritmos Evolutivos Paralelos, bajo un esquema de paralelización basado en islas. ESS-IM ha sido aplicado en la predicción del comportamiento de incendios forestales de forma satisfactoria, mediante su aplicación a casos reales de quemas controladas.
Un esquema general del funcionamiento de ESS-IM se observa en la Figura 4. El proceso monitor, es el encargado de iniciar el funcionamiento del método, mediante el envío de la información del incendio a los masters de cada isla. Dicha información contiene el mapa real del incendio (LFR_x), los rangos de valores para cada uno de los parámetros de entrada y los valores de configuración de los parámetros evolutivos del AEP.
Posteriormente, se da inicio al proceso evolutivo en la Etapa de Optimización del proceso master (EO_{Master}), puntualmente en la subetapa AEP. Esta etapa se encarga de inicializar la población, aplicar los operadores evolutivos, enviar los individuos a los workers para ser evaluados, y finalmente avanzar hacia la siguiente generación. Cada proceso Worker, recibe un individuo por vez, los cuales son simulados en la etapa Simulación de Incendios (SI). Para ello se utiliza el frente de fuego real del incendio en

t_{i-1} (LFR_{i-1}) y los valores de cada individuo (VP). La etapa AEP_F es la encargada de realizar la evaluación de la aptitud de cada individuo. Finalmente, EO_{Worker} devuelve cada individuo evaluado a su respectivo master de isla, donde la etapa AEP, se encarga de almacenar los resultados parciales, evolucionar la población y migrar los individuos hacia las islas vecinas. Este procedimiento se repite hasta que se cumpla alguna condición de finalización.

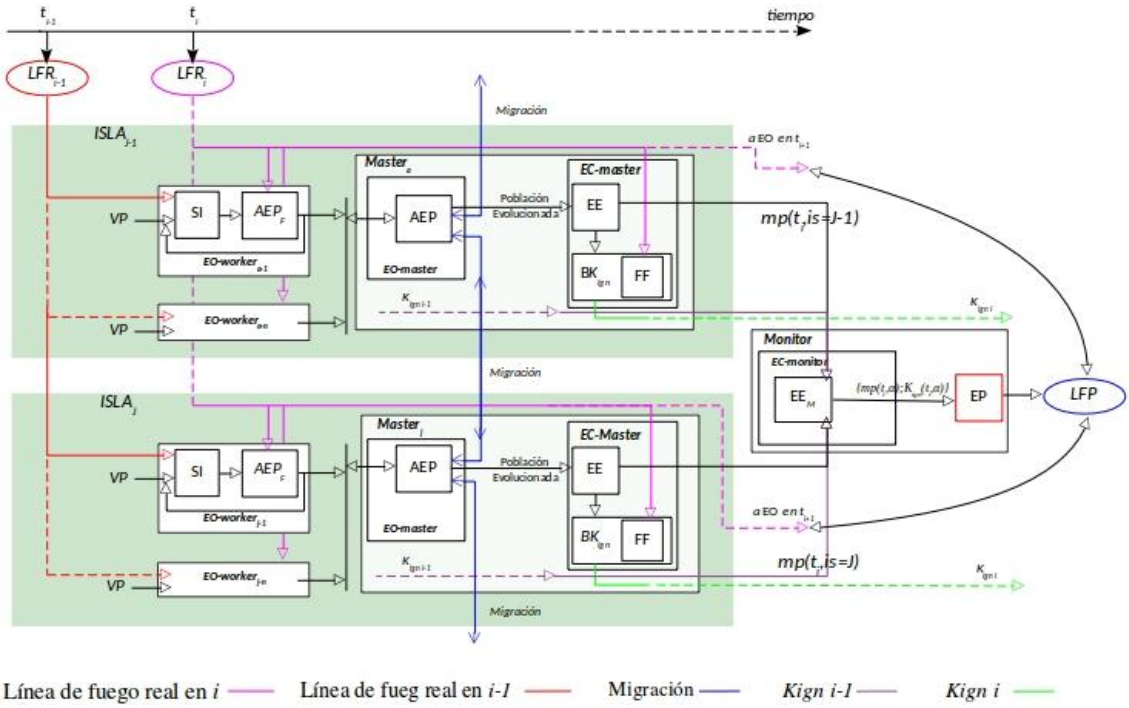


Figura 4: Esquema general del Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas: SI: simulador de incendios; AEP: algoritmo evolutivo paralelo; AEP_F: algoritmo evolutivo paralelo (evaluación de fitness); EO: etapa de optimización; EE: etapa estadística; BK_{ign}: búsqueda de K_{ign}; K_{ign}: valor clave de ignición; FF: función de fitness; EC: etapa de calibración; EP: etapa de predicción; LFP: línea de fuego predicha; LFR_x: línea de fuego real en tiempo *x*; VP: vector de parámetros de entrada; EE_M: etapa estadística en proceso monitor; *mp*: mapa de probabilidad.

Cuando el proceso evolutivo ha terminado, AEP envía la población a la Etapa de Calibración del proceso master (EC_{Master}), puntualmente en la Etapa Estadística (EE). EE se encarga de generar un mapa de probabilidad (m_p), que se crea al considerar la totalidad de los mapas simulados de cada individuo. El m_p generado en t_i por la isla is ($is = 1,2,\ldots,$ j), i.e. $m_p(t_i, is)$, es utilizado para calcular el patrón de comportamiento del incendio (valor clave de ignición K_{ign}), en la sub-etapa BK_{ign} (búsqueda de K_{ign}). Es importante remarcar que cada isla is genera en t_i un $K_{ign}(t_i, is)$, y un $m_p(t_i, is)$, por lo que cada isla envía al proceso monitor un $m_p(t_i, is)$ y un $K_{ign}(t_{i-1}, is)$.
Cuando los resultados de todas las islas son recibidos en el proceso monitor ($EC_{Monitor}$), en la subetapa Estadística del Monitor ($EE_{Monitor}$), ésta genera en t_i un par $\{m_p(t_i, \alpha); K_{ign}(t_i, \alpha)\}$, donde α, representa la isla cuyo par de valores ha obtenido el

mejor valor de aptitud. Este conjunto de datos es enviado a la Etapa de Predicción (EP) para generar la línea el pronóstico de la línea de fuego en el instante t_i (i.e., LFP_i).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el análisis de sintonización se utilizó un incendio controlado realizado en Portugal bajo el proyecto Spread [15]. Dicho experimento cuenta con 4 pasos de simulación (minuto 4, 6, 8 y 10). La evaluación de la calidad de predicción se calcula mediante una función que determina entre 0 y 1, el grado de precisión. Donde un valor igual a 1 representa una predicción perfecta, y un valor igual a 0, indica una predicción completamente errónea.

Tabla I: Parámetros y rangos utilizados en el análisis de sintonización.

N°	Parámetro	Rango
1	Criterio migración	elitista, semi-elitista, aleatorio
2	Cantidad de individuos a migrar	1 al 10 (%)
3	Frecuencia de migración	1 a 20 (%)

Tabla II: Casos más relevantes de la configuración de experimentos (LHD).

Exp.	Criterio migración	Cantidad de individuos a migrar	Frecuencia de migración
1	Elitista	8%	4%
2	Aleatorio	3%	14%
3	Semi-elitista	6%	2%
4	Semi-elitista	2%	14%
5	Aleatorio	4%	17%
6	Semi-elitista	3%	8%
7	Semi-elitista	1%	11%
8	Semi-elitista	8%	7%
9	Elitista	10%	19%
10	Aleatorio	9%	6%

Para cada uno de los parámetros incluidos en el análisis de calibración, se han fijado rangos de valores en función de experimentaciones previas, los cuales son detallados en la Tabla I. Para establecer la cantidad de experimentos y la configuración de parámetros de cada uno de ellos, se ha recurrido a un Diseño por Hipercubo Latino (DHL) [12,13]. El DHL ha sido conformado por un total de 10 experimentos, cada uno con diferente configuración de valores para cada parámetro. En la Tabla II, se puede observar la configuración de parámetros de cada experimento.
La experimentación consistió en lanzar las 10 configuraciones de parámetros del LHD, sobre el mismo incendio controlado y con las mismas poblaciones iniciales de indivi-

duos. Cada configuración de parámetros fue ejecutada 30 veces, y se tomó como resultado final el promedio de las mismas. Es importante resaltar, que se utilizaron poblaciones iniciales diferentes para cada uno de las 30 ejecuciones, pero dicho grupo de poblaciones fue el mismo para cada configuración de parámetros.

RESULTADOS

En la Tabla III, se observan los valores de calidad de predicción obtenidos para cada configuración de parámetros (fila 1 a 10). Los valores de la fila 0, corresponden a los mejores valores obtenidos en trabajos previos, mediante una calibración de parámetros evolutivos [16]. En dicha tabla se resaltan en negrita, las 3 configuraciones de parámetros que brindan la mejor calidad de predicción, se subraya la peor y se denota con "*****" el mejor valor para cada paso de predicción.

Tabla III: Calidad de predicción en cada paso de simulación.

Experimentos	Pasos de predicción			
	4	6	8	10
0	*0,73*	*0,7704**	*0,7398*	*0,779**
1	**0,7485***	**0,7509**	**0,74080**	**0,76826**
2	0,6382	0,4025	0,3508	0,5561
3	**0,7053**	**0,6585**	**0,70856**	**0,652**
4	0,468	0,785	0,6886	0,589
5	0,552	0,6245	0,4268	0,4095
6	0,7056	0,4652	0,665	0,6824
7	0,3606	0,4450	0,5654	0,5825
8	0,4595	0,5654	0,465	0,7066
9	**0,7305**	**0,76784**	**0,7485***	**0,7096**
10	0,39756	0,24456	0,30756	0,4459

Como se puede observar, el peor valor de fitness es obtenido por la configuración que utiliza un esquema de migración aleatorio (experimento 10), junto con una alta frecuencia de migración (i.e., un valor de frecuencia de migración bajo en porcentaje equivale a una frecuencia de migración elevada). Respecto a las mejores configuraciones, se observa claramente que el criterio elitista es el que mejor calidad genera (experimentos 1 y 9), junto con valores moderados de frecuencia de migración y cantidad de individuos migrados. El esquema semi-elitista, también aparece en el ranking de los mejores resultados (experimento 3), con una alta frecuencia de migración y cantidad moderada de individuos migrados.

Al igual que [16], no es posible identificar la mejor configuración de parámetros, ya que puede observarse claramente que los mejores valores de cada paso, celdas marcadas con "*****", se encuentran en diferentes experimentos. Pero si podemos determinar, que un criterio elitista aporta positivamente al mecanismo de búsqueda, y que uno aleatorio genera el efecto contrario.

Además, es importante notar que el 50% de los mejores resultados han sido obtenidos por la configuración de la fila 0, i.e., la obtenida en [16], donde diferentes configuraciones de parámetros son utilizadas en cada paso de predicción.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de sintonización de los parámetros evolutivos del método ESS-IM, puntalmente de aquellos vinculados con el mecanismo de migración del AEP. Para efectuar dicho análisis, ESS-IM fue aplicado en la predicción del comportamiento de un incendio forestal controlado. Los rangos de valores, para cada parámetro bajo análisis. fueron tomados a partir de trabajos previos. Tras efectuar las experimentaciones se pudo determinar que un criterio de migración elitista brinda robustez al mecanismo de búsqueda, junto con valores moderados de cantidad de individuos a migrar y frecuencia de migración. Además, que un proceso de migración aleatorio, desestabiliza el funcionamiento del método haciendo decaer la calidad de predicción, posiblemente porque la aleatoriedad no garantiza mantener individuos de buenas características en las generaciones futuras. Al igual que en trabajos previos se sostiene que no es conveniente recomendar una configuración única de parámetros evolutivos, ya que los mejores resultados son obtenidos mediante diferentes configuraciones. Debido a esto se está trabajando en la implementación de una versión de ESS-IM donde las islas operan con una configuración heterogénea de parámetros. Finalmente, como trabajo futuro se pretende realizar mayor cantidad de experimentaciones que permitan determinar la interdependencia de parámetros.

REFERENCIAS

[1] Infobae, El incendio forestal en Chubut sigue sin control: ya se quemaron 1.600 hectáreas, http://www.infobae.com/2016/01/24/1785121-el-incendio-forestal-chubut-sigue-control-ya-se-quemaron-1600-hectareas/

[2] M. Méndez-Garabetti, G. Bianchini, M. L. Tardivo, P. Caymes-Scutari: Comparative Analysis of Performance and Quality of Prediction Between ESS and ESS-IM, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Volume 314, ISSN 1571-0661, http://dx.doi.org/10.1016/j.entcs.2015.05.004. (2015) 45-60

[3] M. Méndez-Garabetti, G. Bianchini, P. Caymes-Scutari, M. L. Tardivo: Increase in the quality of the prediction of a computational wildfire behavior method through the improvement of the internal metaheuristic, Fire Safety Journal, Volume 82, ISSN 0379-7112, http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.03.002. (2016) 49-62

[4] E. Alba y M. Tomassini: Parallelism and evolutionary algorithms, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, vol. 6, no. 5, (2002) 443-462.

[5] E. Talbi, Metaheuristics: From Design to Implementation, John Wiley and Sons, 2009.

[6] C. Darwin: On the Origin of Species by Means of Natural Selection. Murray, London, 1859.

[7] D. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learn-ing. Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc. Boston, 1989.

[8] T. Mattson, B. Sanders y B. Massingill: Patterns for Parallel Programming. Addison-Wesley, 2005.
[9] R. Buyya, High Performance Cluster Computing: Architectures and Systems, Prentice Hall, 1999.
[10] E. Alba, J. M. Troya: A survey of parallel distributed genetic algorithms, Complexity 4 (**4**), DOI=http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-0526(199903/04)4:4<31::AID-CPLX5>3.3.CO;2-W. (1999) 31-52.
[11] Y. Gong, W. Chen, Z. Zhan, J. Zhang, Y. L., Q. Z., J. L.: Distributed evolutionary algorithms and their models: A survey of the state-of-the-art, Applied Soft Computing, Volume 34, ISSN 1568-4946, http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.061. (2015) 286-300
[12] M.D. Mckay, R.J. Beckman, W.J. Conover: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, 21(**2**), (1979) 239-245
[13] R.L. Iman y W.J. Conover, Small sample sensitivity analysis techniques for computer models, with an application to risk assessment, Communications in Statistics, Part A. Theory and Methods, Vol. 17, (1980) 1749-1842.
[14] R Core Team (2015). R: A language and environment for statis-tical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http://www.R-project.org/, 2015.
[15] D. X. Viegas: Project Spread - Forest Fire Spread Prevention and Mitigation, http://www.algosystems.gr/spread/, 2004.
[16] M. Méndez Garabetti, G. Bianchini, P. Caymes Scutari, M. L. Tardivo, Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas: Calibración de parámetros evolutivos, 13 y 14 de Agosto de 2015, 6th International Symposium on Innovation and Technology, ISSN 2305-9958, ISBN 978-612-45917-9-2, IITEC, IIITEC (International Institute of Innovation and Technology), Lima (Perú) (2015) 77-81

MONITOREO DE LA DEFORMACIÓN CORTICAL EN LAS ESTACIONES PERMANENTES CSLO Y UNSJ EN RESPUESTA AL SISMO OCURRIDO EN ILLAPEL (CHILE, 2015)

Juan Carlos Navarro [abc], Silvia Alicia Miranda [c], Alfredo Héctor Herrada [b].

[a]*CONICET.*
[b]*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.*
[c]*Departamento de Geofísica y Astronomía, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan*
e-mail: jcnavarro_10@hotmail.com

RESUMEN

*Es un hecho que la corteza terrestre se encuentra en movimiento continuo que puede ser caracterizado como global y local. Hay una gran cantidad de eventos naturales como terremotos, erupciones volcánicas y otros fenómenos que contribuyen y causan dichas deformaciones. Es factible cuantificar tales movimientos mediante la tecnología GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem)/GNSS (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem) y en particular a través de redes de estaciones permanentes GPS/GNSS. La **R**ed **A**rgentina de **M**onitoreo **Sa**telital **C**ontinuo (RAMSAC), integrada por 91 estaciones permanentes GNSS diseminadas en la República Argentina, constituye la principal infraestructura geodésica en nuestro país. Siete de ellas (denominadas **UNSJ, CSLO, CSJ1, DINO, GRLS, JCHL y RODE**) se encuentran emplazadas en la Provincia de San Juan y fueron instaladas entre los años 2007 a 2015 mediante un acuerdo de cooperación entre CERI (**C**enter for **E**arthquake **R**esearch and **I**nformation) de la Universidad de Memphis (USA), el **I**nstituto **G**eográfico **N**acional (IGN) y la **U**niversidad **N**acional de **S**an **J**uan (UNSJ). Los datos aportados por dichas estaciones sirven como base fundamental para la definición de los Marcos de Referencias Geodésicos Nacional y Regional y también, en modo creciente, son utilizados libre y gratuitamente por diversos usuarios en levantamientos GNSS que cubren una amplia gama de aplicaciones. En la presente comunicación, se evalúan las variaciones (orden de magnitud centimétrico) en las coordenadas de las Estaciones Permanentes CSLO y UNSJ producidas por el terremoto (M 8.3) ocurrido en Illapel, Chile (ubicación latitud 31° 34´12".00 S, longitud 71° 39´14".40) el 16 de Septiembre de 2015 mediante la implementación del software científico GAMIT/GLOBK desarrollado por el **I**nstituto **T**ecnológico de **M**assachusetts (MIT), cuyo núcleo de procesamiento para el ajuste y cálculo de velocidades de las coordenadas se basa en el manejo del denominado "Filtro Kalman".*

Palabras Clave: Deformación Cortical, GNSS, Estación Permanente, GAMIT/GLOBK.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de posicionamiento Satelital GNSS son una herramienta muy eficiente y precisa a la hora de la obtención de la posición de puntos sobre o cerca de la superficie terrestre y sus correspondientes velocidades. Hoy en día existen varios sistemas que nos permiten utilizar esta aplicación, como los son GLONASS (**GLO**bal'naya **Na**vigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema), EGNOS (**E**uropean **G**eostationary **N**avigation **O**verlay **S**ervice), WAAS (**W**ide **A**rea **A**ugmentation **S**ystem), MSAS (**M**ulti-functional **S**atellite **A**ugmentation **S**ystem) y los futuros sistemas GALILEO y COMPASS de origen europeo y chino, respectivamente. Hasta el

presente, la aplicación más difundida y con mayor aceptación es la que tiene como fundamento al Sistema GPS (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem).

Nuestro país no ha permanecido ajeno a la evolución y uso de esta tecnología. Actualmente cuenta con una red de estaciones GNSS, de acceso libre y sin restricciones a todos los usuarios, de gran valor estratégico y con un amplio horizonte de aplicación, cuya infraestructura brinda soporte a muchas disciplinas y áreas del quehacer nacional e internacional, a través del conocimiento de sus posiciones y estabilidad en el tiempo (Brown *et al.*, 2002; Yeh *et al*, 2007; Yeh *et al.*, 2008). Además conocer la variación secular de las coordenadas de las estaciones es también una de las llaves para la comprensión del proceso mecánico que ocurre sobre una falla durante el ciclo sísmico, es decir, durante los procesos de acumulación y relajación del campo de esfuerzos tectónicos en la cercanía del plano de falla, antes, durante y después de un sismo (Brown *et al.*, 2002; Yeh *et al*, 2007; Yeh *et al.*, 2008). Particularmente, la cuantificación de los desplazamientos cosísmicos asociados directamente a la ruptura, proporciona información sobre el mecanismo de la fuente (posición, tamaño, momento, etc.) y permiten modelar este proceso, además de comparar con la información obtenida por la observación de las ondas sísmicas.

El día 16 de Septiembre de 2015 a las 19:54hs (hora local de Chile), ocurrió un sismo de magnitud 8.3 (Mw) frente a las costas de la región de Coquimbo, en la localidad de Illapel, en el vecino país de Chile. Las coordenadas epicentrales fueron: latitud 31° 34′12”.00 S y longitud 71° 39′14”.40 O, con una profundidad hipocentral de 11 km (Centro Sismológico Nacional Chile, 2015). Este terremoto es el mayor registrado desde el 27 de febrero de 2010 (8.4Mw, Maule) y el tercero mayor desde el 22 de Mayo de 1960 (9.5Mw, Valdivia) (Barrientos, 2015).

La geometría de la falla que originó este sismo y su ubicación son consistentes con la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Durante los primeros 30 días posteriores a la ocurrencia del sismo principal el CSN (Centro Sismológico Nacional Chile) localizó más de 1400 réplicas, de las cuales la mayor fue de una magnitud de 7.6 Mw.

Con ayuda de las técnicas satelitales GNSS se estimó la deformación producida por el terremoto en la costa y en el interior del continente, arrojando valores máximos que van entre los 18 cm de levantamiento y 15 cm de hundimiento para los cambios verticales y desplazamientos máximos del orden de los 2 m en dirección oeste para los cambios horizontales (Barrientos, 2015).

En este contexto, en el presente trabajo se calculan las variaciones en las coordenadas de las estaciones GNSS permanentes UNSJ y CSLO emplazadas en la Provincia de San Juan (Figura 1), a causa del terremoto de Illapel.

La obtención de dichas coordenadas se basa en el procesamiento y posterior ajuste de los datos de una red de estaciones permanentes GNSS (Figura 2), convenientemente seleccionadas, entre las que se encuentran CSLO y UNSJ, lo que nos permite no sólo conocer la variación de las coordenadas de las estaciones, sino también que esas posiciones se encuentren referidas a un marco de referencia geodésico.

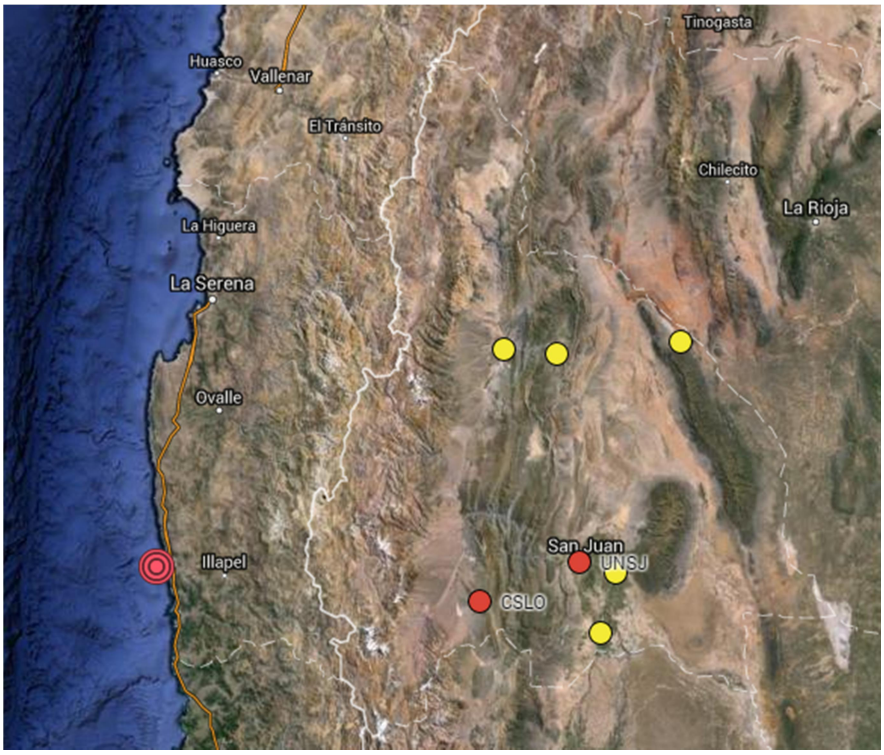


Figura 1. Ubicación de las estaciones GNSS permanentes de la Provincia de San Juan, Argentina y epicentro del sismo de Illapel, Chile.

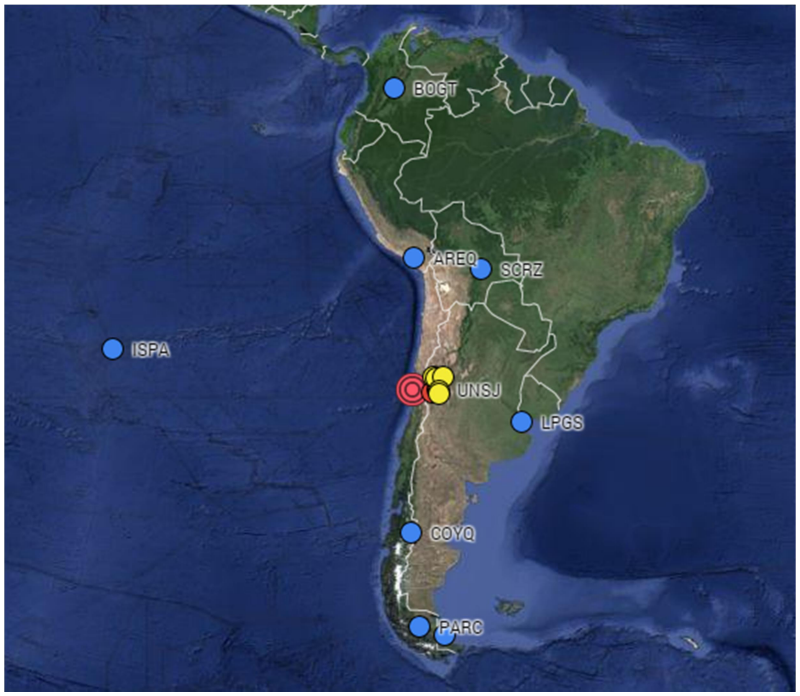


Figura 2. Mapa de la Red de Estaciones Permanentes involucradas en el procesamiento.

METODOLOGÍA

El monitoreo de la deformación cortical en las estaciones UNSJ y CSLO, se basó en constituir una red virtual de estaciones GPS permanentes, seleccionadas con el objetivo de analizar, procesar y ajustar los datos diarios colectados, de modo de obtener soluciones semanales semi-libres de cada una de las estaciones intervinientes en el procesamiento.

Uno de los factores determinantes para el éxito de una red GPS de referencia es el análisis y control de calidad de los datos, lo que nos da un índice del nivel de posicionamiento que es factible alcanzar usando la misma (Brown et al., 2002; Yeh et al., 2007; Yeh et al., 2008; Herrada et al., 2010). Es por ello que para llevar a cabo el control mencionado sobre las observaciones GPS "crudas", se utilizó el programa TEQC (Translate/Edit /Quality/Check), desarrollado en UNAVCO (University NAVstar COnsortium) (Estey & Meerterns, 1999). TEQC permite al usuario transformar archivos de receptor en lenguaje binario al formato RINEX o formato estándar de intercambio independiente del receptor, pudiendo entonces los archivos ser editados y sometidos a un control de calidad.

En este análisis se consideraron los siguientes índices:

- '**Obs**' es el número diario de observaciones de todos los satélites. La importancia de este índice se explica si se tiene presente que en principio, un mayor número de datos brindaría mejores posibilidades de corregir errores (Yeh *et al.*, 2008). Este índice depende del número de épocas, en nuestro caso 5759. No obstante, el número de satélites recibidos por el receptor varía en cada época, de modo que el número de observaciones cambia con el tiempo. En este sentido, las disminuciones en el número de datos se consideran pérdidas relacionadas con diferencias en el medio ambiente o en el receptor (i.e., baja relación señal/ruido, datos L1 y L2 no apareados y pérdida del código C/A).

- '**slps/1000**' es el número de saltos de ciclo cada 1000 observaciones. Los saltos de ciclo son debidos a una pérdida de captura de señal en los datos de fase, manifestada por saltos bruscos en la señal recibida. Las causas pueden ser variadas: bloqueo de la señal de un satélite por edificios, influencia de eventos ionosféricos o troposféricos repentinos, mal funcionamiento del receptor, o inclinación de la antena entre otros factores (Seeber, 2003).

- '**mp1**' es el efecto medido en metros de multicamino ('multipath') sobre L1, calculado como (ver Ec. [1]):

[1]

$$\mathrm{mp1} = \mathrm{P_1} - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_2$$

P es la observación de seudo-distancia y Φ la observación de la fase portadora, f1 y f2 frecuencias de Φ1 y Φ2, respectivamente.

[2]

$$\alpha = \left(\frac{\mathrm{f_1}}{\mathrm{f_2}}\right)^2$$

- '**mp2**' es el efecto (en metros) de 'multipath' sobre L2, computado según (ver Ec. [3]):

[3]

$$mp2 = P_2 - \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1} - 1\right)\Phi_2$$

mp1 y mp2 son errores estocásticos que pueden ser considerados como ruido en las observaciones (Yeh *et al.*, 2007). El efecto 'multipath' resume la situación en donde la señal GPS arriba al receptor desde más de una trayectoria, debido a que la señal se refleja en un edificio, un auto, un árbol, etc. (Seeber, 2003). Para eliminar los efectos de reloj de estación, reloj de satélites, y retardos troposférico y ionosférico, mp1 y mp2 son calculados como combinaciones lineales de las mediciones de código P1 y P2 (seudo-distancia) y fases Φ1 y Φ2 hechas por el receptor GPS, e involucran tanto señales de trayectorias directas como indirectas

(Estey & Meertens, 1999). Estas últimas provienen de interferencias producidas por la reflexión y dispersión de la señal GPS en los alrededores de la antena. Valores usuales de error cuadrático medio promedio (rms avg mp1 y rms avg mp2) deberían alcanzar unas pocas décimas de metro, y en general son diferentes para distintos tipos de receptores, pudiendo ser disímiles para el mismo receptor en función de la versión del programa interno ('firmware') (Ray & Senior, 2003).

Puesto que todo software de posicionamiento preciso presupone una trayectoria directa entre el satélite y el receptor (Hugentobler *et al.*, 2001), la presencia de errores de multicamino en los observables GPS conduce a errores en el posicionamiento. Variaciones inusuales en mp1 y mp2 (en especial, saltos bruscos o tendencias) podrían indicar problemas en la calidad de los datos de la estación (Yeh *et al.*, 2007).

Para el procesamiento y ajuste de los datos se utilizó el software científico GAMIT/GLOBK 10.5, desarrollado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology*)*, el Instituto Scripps de Oceanografía y la Universidad de Harvard con el apoyo de NSF (National Science Foundation).

GAMIT/GLOBK es un software libre, que consiste en un conjunto completo de programas para el análisis de mediciones GPS, cuya finalidad principal es la de conocer con exactitud la posición de puntos en la superficie terrestre y sus velocidades, principalmente para estudiar la deformación de la corteza terrestre. Su núcleo de procesamiento para el ajuste y cálculo de velocidades de las coordenadas se basa en el manejo del denominado "Filtro Kalman" alisado (Herring et al., 2010).

Para el caso específico de nuestro estudio, primeramente se seleccionaron los sitios a intervenir en el mismo (ver Figura 2), o sea además de las estaciones permanentes de San Juan objeto del estudio (UNSJ y CSLO), se procesaron datos correspondientes a las estaciones GNSS permanentes de San Juan restantes (DINO, CSJ1, RODE, JCHL y GRLS) y datos correspondientes a las estaciones continuas GNSS, AREQ, BOGT, COYQ, ISPA, LPGS, PARC, RIO2, SCRZ. Esto es debido a que estas últimas cumplen la función de establecer el marco de referencia en el cual estamos trabajando. Se trabajó con este número de estaciones fiduciales porque de esta forma se cuenta con una cantidad adecuada (superabundancia) de estaciones de referencia para obtener un resultado óptimo en el procesamiento, ya que no siempre se publican los datos (RINEX) de todas las estaciones debidos a problemas ajenos al procesamiento (fallas en receptores, cortes de energía, etc.).

Con respecto a las estaciones fiduciales, es importante aclarar que las mismas forman parte de la Red SIRGAS-CON, que establece el marco de referencia a nivel regional (América) y algunas (PARC, LPGS, ISPA) a su vez, forman parte de la Red de Estaciones Permanentes del "corazón" IGS (International Geodetic Survey), que es la encargada de establecer el marco de referencia internacional oficial (IGB 08, International Geodetic Survey, 2012), al cual se encuentra referido el procesamiento, lo que garantiza estándares de calidad intrínsecos y una evaluación más amplia de los resultados obtenidos.

Otras características en las que se hizo enfoque fueron: i) que la ubicación de las mismas fuera distribuida de manera homogénea respecto de la zona en estudio y ii) que se ubicaran en las direcciones de los puntos cardinales en función nuevamente de las estaciones a estudiar.

Como resultado de la implementación de este conjunto de programas se obtuvieron las coordenadas semanales semi-libres de las estaciones UNSJ y CSLO para llevar a cabo el posterior análisis, estudio y modelación de diversos fenómenos terrestres, atmosféricos y climatológicos.

Por último, debido a que las dos estaciones GNSS permanentes motivo del estudio, forman parte de la Red de Estaciones Permanentes de SIRGAS-CON (Sistema de Referencia Geocéntrico de las Américas) se validaron los resultados obtenidos, mediante la comparación de los mismos con el procesamiento de coordenadas semanales semi-libres, realizado por SIRGAS, dando como resultado diferencias en el orden de unos pocos milímetros. Se debe tener en cuenta que se está comparando un procesamiento regional como el objeto de estudio, con un procesamiento más global, como el realizado por SIRGAS.

RESULTADOS

La Tabla I muestra el resultado del procesamiento semanal de las coordenadas de las estaciones GNSS Permanentes UNSJ y CSLO, correspondiente a las semanas GPS 1861 hasta la semana GPS 1866. Nótese que el sismo ocurrió el día GPS 259, que corresponde a la semana GPS 1862, de modo que nuestro procesamiento analiza los movimientos cosísmicos en las tres componentes principales (horizontales norte-sur (X), este-oeste (Y) y vertical (Z). Las figuras 3 a 5 presentan los cambios temporales calculados de las coordenadas de las estaciones.

Tabla I. Coordenadas calculadas para las estaciones UNSJ y CSLO para las semanas 1861 hasta 1866. En rojo se encuentran las coordenadas correspondientes a la semana en la que tuvo lugar el sismo.

Est./Coord	X (metros) Proc.	Y (metros) Proc.	Z (metros) Proc.
CSLO (1861)	1918784.60034	-5078509.36256	-3341569.29318
UNSJ (1861)	1987485.08096	-5065493.35391	-3317557.38376
CSLO (1862)	1918784.62280	-5078509.36607	-3341569.29575
UNSJ (1862)	1987485.10113	-5065493.35619	-3317557.38884
CSLO (1863)	1918784.52604	-5078509.44861	-3341569.31360
UNSJ(1863)	1987485.04161	-5065493.41955	-3317557.42171
CSLO (1864)	1918784.52601	-5078509.46937	-3341569.32311
UNSJ (1864)	1987485.04288	-5065493.43837	-3317557.43048
CSLO (1865)	1918784.49750	-5078509.43358	-3341569.27604
UNSJ (1865)	1987485.01605	-5065493.40817	-3317557.38693
CSLO (1866)	1918784.51242	-5078509.45038	-3341569.28975
UNSJ (1866)	1987485.03253	-5065493.42466	-3317557.40193

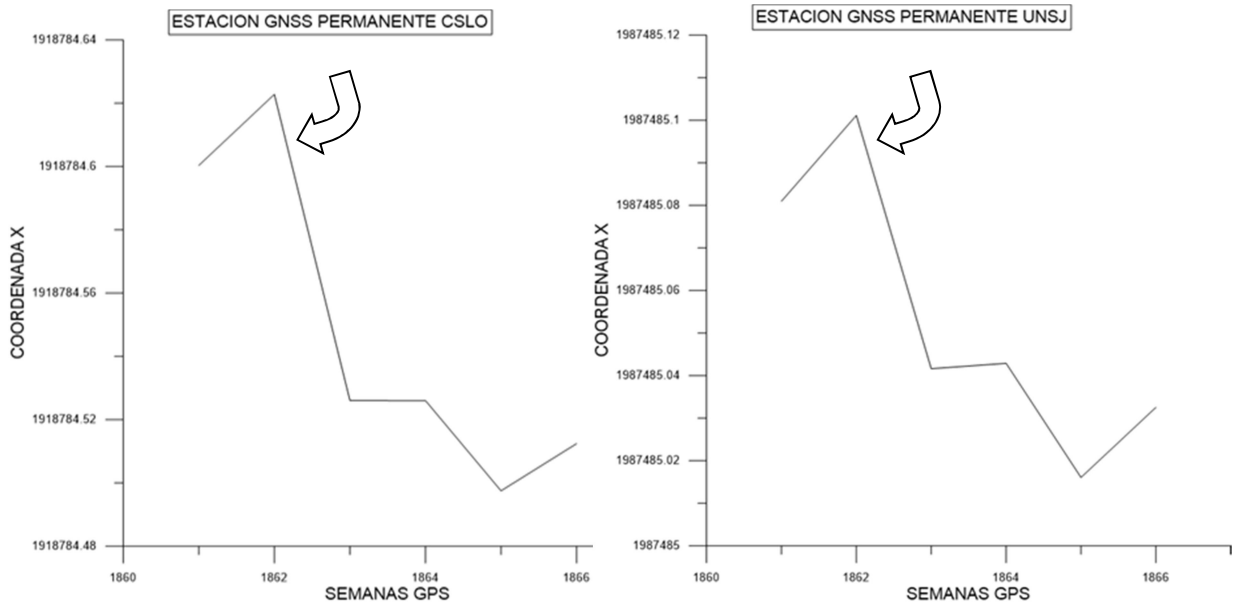


Figura 3. Variación de la componente X en metros, de las estaciones GNSS permanentes CSLO y UNSJ, en el intervalo comprendido entre las semanas GPS 1861 y 1866. La flecha indica la ocurrencia del sismo Illapel del 16 de setiembre de 2015.

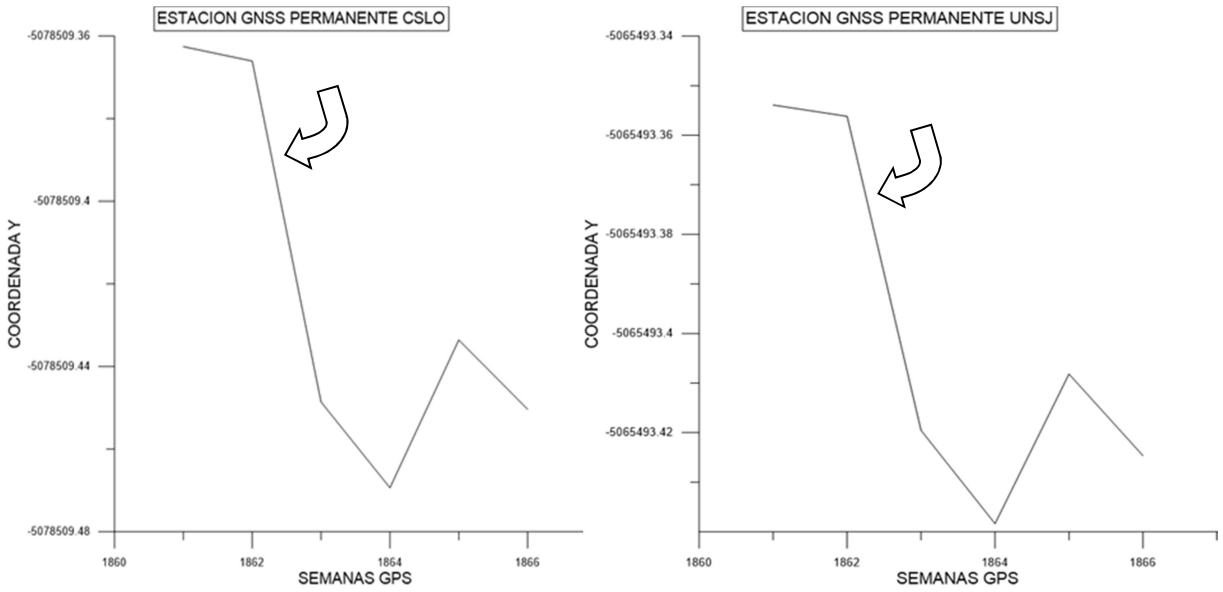


Figura 4. Variación de la componente Y en metros, de las estaciones GNSS permanentes CSLO y UNSJ, en el intervalo comprendido entre las semanas GPS 1861 y 1866. La flecha indica la ocurrencia del sismo Illapel del 16 de setiembre de 2015.

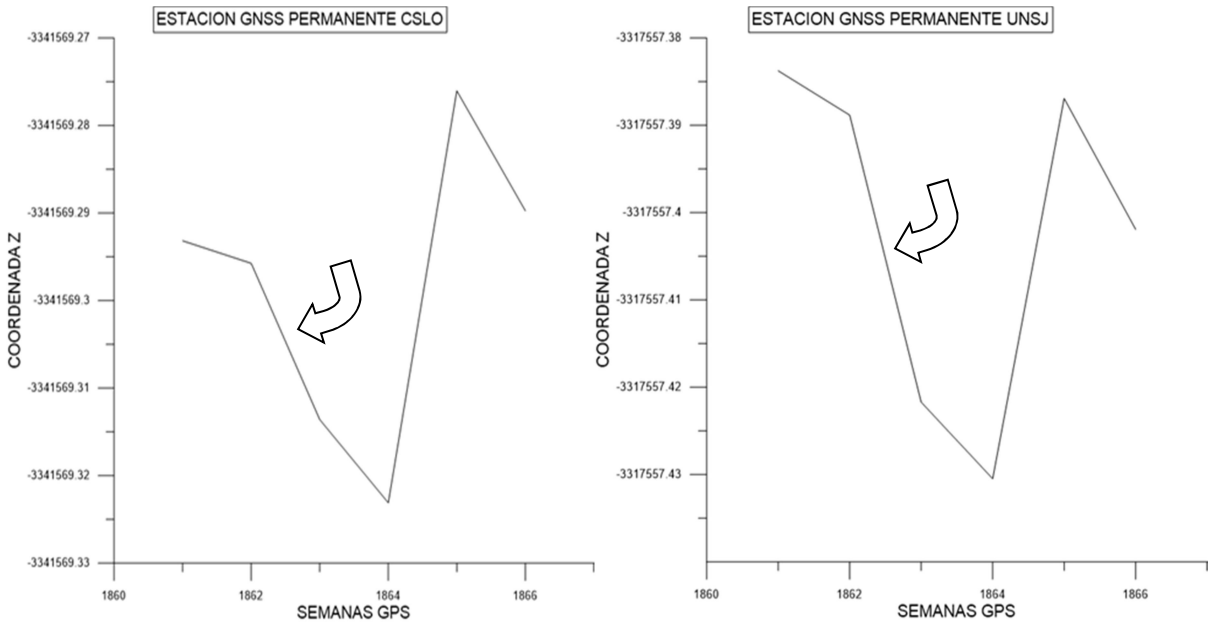


Figura 5. Variación de la componente Z en metros, de las Estaciones GNSS Permanentes CSLO y UNSJ, en el intervalo comprendido entre las semanas GPS 1861 y 1866. La flecha indica la ocurrencia del sismo Illapel del 16 de setiembre de 2015.

En la Tabla II se puede observar la diferencia que existe entre coordenadas de una semana con respecto a las coordenadas de la semana siguiente para las estaciones GNSS permanentes UNSJ y CSLO.

Tabla II. Diferencias entre coordenadas semanales.

Est./Coord	X (metros) Proc.	Y (metros) Proc.	Z (metros) Proc.
CSLO(1861-1862)	-0.022	0.004	0.003
UNSJ (1861-1862)	-0.020	0.002	0.005
CSLO (1862-1863)	0.097	0.083	0.018
UNSJ (1862-1863)	0.060	0.063	0.033
CSLO (1863-1864)	0.000	0.021	0.010
UNSJ (1863-1864)	-0.001	0.019	0.009
CSLO (1864-1865)	0.029	-0.036	-0.047
UNS (1864-1865)	0.027	-0.030	-0.044
CSLO (1865-1866)	-0.015	0.017	0.014
UNSJ (1865-1866)	-0.016	0.016	0.015

Evidentemente de acuerdo a la tabla anterior la mayor diferencia, por lo tanto el mayor desplazamiento, se produjo en la semana en la que tuvo lugar el terremoto. Es lógico afirmar que la estación que más se "movió", fue la CSLO, debido a que la misma se encuentra más cerca del epicentro que origino el sismo. Surge la necesidad de estudiar con mayor profundidad lo sucedido entre las semanas 1864 y 1865, debido a que los valores de las diferencias entre coordenadas no se comportan como en las demás semanas, pudiendo tener su causa en un deficiente procesamiento debido a la falta de datos, réplicas del sismo, etc.

Como dato que serviría de aporte a una investigación a futuro con mayor profundidad, se registraron los días 3 y 5 de octubre de 2015, que corresponden a los días GPS 276 y 278, de las semanas 1864 y 1865 respectivamente, réplicas del sismo en Tongoy, Región de Coquimbo a una profundidad de 33.9 km y 29 km con una magnitud mayor a 6 Mw.

Como forma de validar los resultados obtenidos, se hizo la diferencia semanal entre las componentes de las coordenadas obtenidas del procesamiento, con las componentes de las coordenadas procesadas por la Red SIRGAS-CON, lo que se muestra en la Tabla III.

Tabla III: Diferencia semanal (en metros) entre las componentes de las coordenadas obtenidas (Tabla 1) en este trabajo y las componentes de las coordenadas procesadas por la Red SIRGAS-CON, para las estaciones CSLO y UNSJ.

Est./Coord	X (SIRGAS-Proc.)	Y (SIRGAS-Proc.)	Z (SIRGAS-Proc.)
CSLO (1861)	0.005	-0.017	-0.009
UNSJ (1861)	0.003	-0.013	-0.010
CSLO (1862)	-0.015	-0.014	-0.008
UNSJ (1862)	-0.018	-0.012	-0.006
CSLO (1863)	-0.015	0.012	0.019
UNSJ(1863)	-0.016	0.014	0.022
CSLO (1864)	-0.018	0.029	0.028
UNSJ (1864)	-0.020	0.032	0.032
CSLO (1865)	0.008	-0.004	-0.015
UNSJ (1865)	0.006	-0.001	-0.011
CSLO (1866)	-0.007	0.011	-0.003
UNSJ (1866)	-0.011	0.016	0.004

Como se puede observar, las diferencias que existen entre las coordenadas de ambos procesamientos alcanzan un valor medio de 1,5 cm para las tres componentes, y en algunos casos es de unos pocos mm, lo que nos da un indicador de que nuestro procesamiento fue muy satisfactorio, teniendo en cuenta que se está comparando como se dijo anteriormente, un procesamiento regional (pocas estaciones) con un procesamiento global (muchas estaciones).

Las diferencias obtenidas en la semana 1864 están siendo analizadas, puesto que los valores diferencia no son muy satisfactorios, o en todo caso son un tanto elevados, probablemente debido a una mala calidad de las observaciones.

Futuros estudios investigarán cómo se registraron las deformaciones presísmicas y postsísmicas en las estaciones de San Juan, analizando las implicancias sismotectónicas del evento de Illapel.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de las series temporales de coordenadas GPS de las estaciones UNSJ y CSLO se determinó que el orden de magnitud de los desplazamientos cosísmicos asociados al terremoto de Illapel (Mw 8.4) es centimétrico. En particular, la estación GNSS permanente CSLO, más cercana a la zona epicentral, sufrió desplazamientos aproximados de ΔX= 9 cm, ΔY= 6 cm, ΔZ= 2 cm Para la estación GNSS permanente UNSJ se pudo establecer desplazamientos del orden de ΔX= 6 cm, ΔY= 6 cm, ΔZ= 3 cm.

Estos valores implican, geodésicamente hablando, un desplazamiento importante de la posición de ambas estaciones, lo cual indicaría la necesidad de un recalculo de las coordenadas de las mismas.

El monitoreo de las coordenadas de las estaciones UNSJ y CSLO en respuesta al terremoto, utilizando esta metodología nos da un índice de la deformación cortical muy realista y preciso, debido a que las diferencias con una red de procesamiento de orden superior, como lo es la red SIRGAS-CON, son del orden del centímetro aproximadamente y en algunos casos de unos pocos milímetros.

Los resultados obtenidos, y a obtener utilizando series temporales extendidas a las etapas pre-postsísmicas, contribuirán al conocimiento de los rasgos tectónicos de la región afectada por este evento sísmico. Es indispensable para un estudio de este tipo contar con una red de

estaciones GNSS permanentes que provea datos confiables, y que los mismos sean publicados con continuidad, para asegurar el perfecto funcionamiento de la metodología propuesta.

REFERENCIAS

[1] Barrientos, S., 2015. Informe Técnico Terremoto Illapel. Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 19 pp, 2015.

[2] Brown, N., A. Kealy, J. Millner, P. Ramm and I. P. Williamson, 2002. Quality control and integrity monitoring of the Victorian GPS reference network. Proceedings of FIG XXII International Congress, 19-26 April, Washington D.C. USA, Commission 5, 1-13.

[3] Estey, L. H. and C. M., Meertens, 1999. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. GPS Solutions, V3, 1: 42-49.

[4] Herrada A., Miranda S., Fuentes C., O. Torres Lobato, H. Pintos, R. Smalley (Jr.), 2010. Monitoreo de la calidad de datos GPS continuo: La Estación UNSJ (San Juan-Argentina). Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Geoacta 35, 55-62,2010.

[5]Herring T. A., R. W. King (MIT), S. C. McClusky (ANU), 2010. Gamit Reference Manual. GPS Analysis at MIT 10.4.

[6] Hugentobler, U., S. Schaer and P. Fridez, 2001. BERNESE GPS Software Version 4.2, 650 Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp.

[7] Ray, J., K. Senior, 2003. Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements. Metrologia, 40, 215-232.

[8] Seeber, G., 2003. Satellite Geodesy. Foundations, methods and applications. 2nd. Edition. Walter de Gruyter. Berlin-New York, 2003. 588 pp.

[9] Yeh, T. K., C. S. Wang, B. F. Chao, C. S. Chen and C. W. Lee, 2007. Automatic data-quality monitoring for continuous GPS tracking stations in Taiwan. Metrologia, 44, 393-401.

[10] Yeh, T. K., Y. A. Liou, C. S. Wang and C. S. Chen, 2008. Identifying the degraded environment and bad receivers setting by using the GPS data quality indices. Metrologia, 45: 562-570.

MODIFICACIONES DEL PAISAJE NATURAL, VALLE GRANDE, SAN RAFAEL, MENDOZA

Pucciarelli, María Natalia [a]

[a]*Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNCuyo, Mendoza, ARGENTINA*

e-mail: natypucciarelli@hotmail.com

RESUMEN

El sur de la provincia de Mendoza es un espacio geoecológicamente diverso y con una riqueza paisajística destacada. La razón de ello es la combinación de variables naturales tanto geomorfológicas y climáticas, como biológicas e hidrológicas. A estos aspectos físicos se le suman obras humanas sobre los ríos, que generan el surgimiento de bellos espacios de recreación.

El sector conocido como Valle Grande –departamento de San Rafael- no es la excepción, el majestuoso paisaje natural junto al aprovechamiento hídrico hacen de ese paraje uno de los lugares más elegidos por el turismo a nivel provincial y nacional. Pero su utilización turística no ha sido totalmente sustentable y se asiste a un deterioro del ecosistema natural, mayormente visible en la disminución y reemplazo de las comunidades vegetales.

Es por lo antes mencionado que este trabajo tiene como objetivo principal realizar un diagnóstico geoecológico del espacio comprendido entre el dique Valle Grande y el inicio del espacio rural del distrito El Nihuil (34°47´22.60"S y 68°26´55.31"W), departamento de San Rafael, provincia de Mendoza. Para lo cual se indagan no sólo las características de los componentes del paisaje natural sino también el estado de los mismos y sus agentes perturbadores.

La hipótesis guía plantea que el elemento paisajístico más modificado es la vegetación y que el causante principal de ello es el incorrecto modelo turístico implementado.

Para lograr esto se implementan distintas metodologías (método geográfico, inductivo y deductivo) y técnicas multidimensionales, multivariables y multiescalares de manera directa e indirecta. Todo ello bajo el enfoque epistemológico sistémico y de la complejidad.

La presente investigación es parte del proyecto de tesis doctoral, en etapa de elaboración, por lo que sus resultados son parciales. A pesar de ello se puede aseverar que el paisaje natural de Valle Grande presenta modificaciones en las comunidades vegetales.

Palabras Clave: ecosistema, paisaje natural, alteraciones

INTRODUCCIÓN

El sur de Mendoza es un espacio con una gran diversidad geoecológica y con una riqueza paisajística destacada a nivel provincial. Estas características están explicadas principalmente por la combinación de múltiples variables naturales como un clima zonal con caracteres propios, una configuración biológica específica, una importante diversidad de unidades geomorfológicas y edáficas, así como también variaciones en la distribución del agua superficial y subterránea. Todos estos aspectos se conjugan de manera positiva y generan espacios propicios para la instalación humana y/o la creación de distintas obras de aprovechamiento de recursos naturales. Con el correr del tiempo este sitio se fue configurando como un

polo turístico pero sin la debida planificación, por lo que nos encontramos frente a un paisaje natural degradado, principalmente en su esfera vegetal.
La disminución en variedad y cantidad de especies animales y vegetales, y el deterioro del suelo y del agua generan una disminución de relaciones ecosistémicas causando un empobrecimiento general en el paisaje natural. Tales perturbaciones se vinculan con modificaciones antrópicas.
El área en estudio se localiza al sur de Mendoza en el departamento de San Rafael, en el distrito El Nihuil, en el paraje denominado Valle Grande, a 37 km de la cabecera departamental y siguiendo la ruta provincial 173. Específicamente el sector analizado se extiende desde el dique compensador Valle Grande hasta el punto en el cual el curso del río abandona el encajonamiento dentro del bloque de San Rafael, cuyas coordenadas son 34º47´22.60"S y 68º26´55.31"W (ver Imagen 1).



Imagen 1. Espacio en estudio. Curso medio del río Atuel, Valle Grande, San Rafael, Mendoza
Fuente: Google Earth, 2015

Objetivos

- Conocer las características geoecológicas del ecosistema del curso medio del río Atuel, más específicamente en del sector denominado Valle Grande.
- Identificar espacial y temporalmente las alteraciones producidas en dicho ecosistema.
- Reconocer los posibles agentes perturbadores vinculados a la oferta turística.

Hipótesis de trabajo

- El elemento del paisaje natural más modificado de Valle Grande es la vegetación natural.
- La principal causa de dicha degradación es la actividad turística.

Metodología

La metodología implementada es diversa y complementaria. A partir del método de Factores de Control (Bailey, 1996) y del mapa de formaciones vegetales de la provincia de Mendoza (Roig, F., 2000) se realizó una delimitación jerárquico-espacial de los ecosistemas: macro, meso y ecosistemas menores (ver Figura 1).

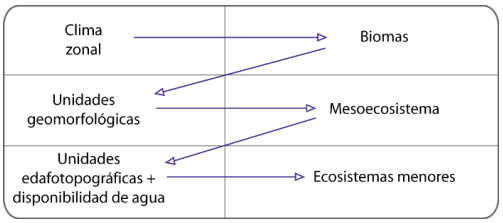


Figura 1. Método adoptado para delimitar espacialmente los diferentes ecosistemas en niveles jerárquicos.
Autor: Moira Alessandro y colaboradores. Año 2008.

Así, el espacio en estudio se encuentra abordado de manera jerárquico escalar a macro, meso y micro escala (ver Figura 2). Esta investigación toma la escala micro, es decir la de ecosistemas, para analizar las características geoecológicas del paisaje natural de Valle Grande.

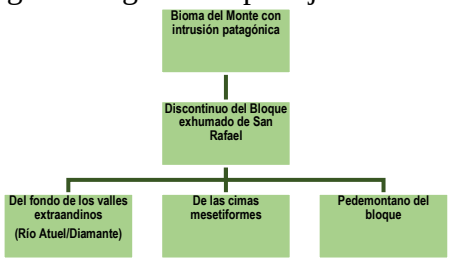


Figura 2. Jerarquía escalar de los sistemas de vida
Autor: Pucciarelli, N. 2014



Foto 1. Mesoecosistema discontinuo del Bloque exhumado de San Rafael.
Fuente: archivo fotográfico de Natalia Pucciarelli. 2010



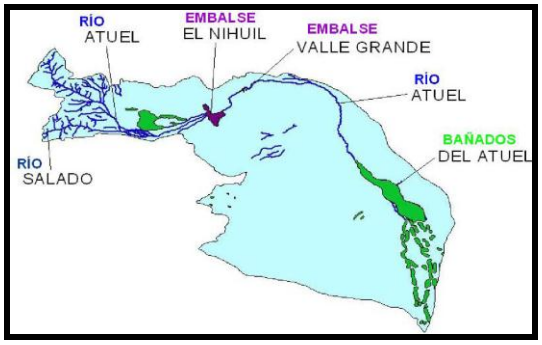
Foto 2. Ecosistema del Fondo de los valles extraandinos.
Fuente: archivo fotográfico de Natalia Pucciarelli. 2010

Con el objeto de identificar las características geoecológicas del paisaje natural y la dinámica antrópica que se desarrolla en el espacio se recurre a la implementación del método geográfico, priorizando la observación directa para la recolección de datos, complementada con recopilación bibliográfica sobre la zona. Todo esto bajo en enfoque inductivo y deductivo de análisis.
Luego se ponen en práctica técnicas multidimensionales con el fin de conocer y evaluar los recursos naturales renovables, su dinamismo y las relaciones que se dan en el ecosistema en cuestión. A partir de fichas y matrices se aborda cada uno de los elementos constitutivos del paisaje natural de manera cualitativa y cuantitativa. Su aplicación implica la comparación de dos situaciones dentro del mismo ecosistema, una óptima o testigo y otra real (Alessandro, M. y Pucciarelli, N., 2004). Complementan las herramientas los denominados ecogramas, planillas de observación en las cuales se incluyen datos como: formaciones vegetales, unidades fisonómicas, geoformas, pendiente, altura, localización con GPS, grupo de factores ecológicos observados,

cobertura, estratos y composición florística, características del suelo, recursos hídricos o disponibilidad de agua, fauna nativa/ manifestaciones de …, procesos naturales, actividades antrópicas actuales, degradación antrópica y geosistema asociado.
Para analizar la dinámica antrópica del geoecosistema se recurre a entrevistas, relevamientos puntuales y charlas con referentes turísticos de la zona.

CAPÍTULO I – Elementos constitutivos del paisaje natural

El paisaje natural se distingue por poseer una amplia diversidad geológica, biológica, geomorfológica y altimétrica.
Localizado entre el relieve positivo de la cordillera de los Andes al oeste y las zonas llanas hacia el este. Geomorfológicamente se ubica en el Bloque antiguo o Bloque exhumado de San Rafael, unidad pericordillerana con estructuras de rumbo general NO-SE que coinciden con una antigua franja de fracturación paleozoica (Cisneros H., 2002). Dentro de ella se pueden distinguir tres áreas geomorfológicas: 1) Zona positiva u occidental; 2) Zona negativa u oriental, y 3) Zona de transición.
El sector analizado corresponde a la zona positiva u occidental caracterizada por presentar una orientación dominante NNW-SSE y elevaciones superiores a los 650 metros. Es en este tramo en el cual se presentan los afloramientos más representativos del bloque como la formación Cochicó, Cerro La Ventana, entre otras, así como también los mejores recursos económicos de la zona.
Esta unidad estructural debe su fisonomía actual a la convergencia de múltiples factores: sucesivos eventos geológicos, principalmente los desarrollados durante el terciario y el cuaternario, y a la acción de fenómenos climáticos que dieron origen a una gran diversidad litológica.
El sustrato está formado por sedimentos impermeables del terciario superior, sobre los que se acumulan depósitos aluvionales y fluviales que fueron aportados en sucesivos momentos por el río Atuel. La sedimentación cuartaria da origen a un cono aluvial secundario y de materiales finos, a partir del cual se inicia la extensa llanura aluvial sanrafaelina.
El río Atuel corta verticalmente al bloque y le confiere un paisaje característico, el de valle encajado. Es el quinto afluente del Desaguadero, con un caudal medio anual de 34.7 m3/seg. aforados en la estación La Angostura y una longitud de 600 km aproximadamente. Presenta un desarrollo dominante Oeste-Este y atraviesa distintos ambientes geográficos desde la cordillera de los Andes, con picos que superan los 5.000 msnm hasta la llanura semidesértica de 400 msnm en su tramo final, donde ocasionalmente desemboca en el río Salado. La superficie total de la cuenca es de 13.000 km2.



Carta 1. Cuenca del río Atuel.
Fuente: http://www.hidricosargentina.gov.ar/59.pdf

La cuenca hidrológicamente activa se encuentra en la región oriental, donde las precipitaciones pluvio-nivales de origen orográfico varían entre 600 y 800 milímetros anuales, que alimentan a ríos y arroyos de

la desarrollada red imbrífera. En la región occidental por el contrario, con un régimen pluviométrico del orden de los 250 mm anuales, el río es prácticamente alóctono.
Climáticamente hablando nos encontramos dentro de la región dominada por el clima seco, con veranos cálidos e inviernos fríos, gran evapotranspiración potencial, precipitaciones estivales concentradas, torrenciales y escasas; y que según la clasificación de Köppen corresponde al tipo BW: "Desértico", árido con precipitaciones anuales inferiores a 400 mm.
A diferencia del sector norte de nuestra provincia, que también responde al clima BW, los veranos no son tan cálidos y los inviernos más rigurosos, este fenómeno se explica por al aumento de la latitud y a su vez por las modificaciones altimétricas. Las precipitaciones siguen siendo estacionales, el mes más lluvioso es enero y el más seco es julio.
La erosión fluvial, pluvial y eólica son procesos naturales muy presentes en este encajonado valle. Ellas originan el pintoresco paisaje que cautiva a los visitantes. La presencia de sedimentos de diferente origen y dureza ha generado caprichosas formas de erosión diferencial.
Los suelos son en general entisoles o de escasa evolución, desarrollados recientemente sobre sedimentos depositados por los ríos (Torrifluventes típicos). La aridez del clima limita su formación siendo pobres en materia orgánica y salinos, con frecuentes afloramientos rocosos. Se observa acumulación de sedimentos aluviales en zonas bajas y de arena a medida que se asciende.
El área en estudio se localiza en la provincia biogeográfica del Monte con intrusión patagónica (Alessandro, M. y Pucciarelli, N. 2013). Presenta una fisonomía vegetal caracterizada por una estepa arbustiva alta (de 1 a 3 m de altura), a veces muy abierta, con una cobertura general de entre el 60 y 80%. Dominada por la presencia de jarillas (*Larrea divaricata, Larrea nítida*), con ejemplares de chañar brea (*Cerciduim praecox*), atamisque (*Capparis atamisquea*), falsa jarilla (*Zuccagnia punctata),* pichana (*Psila spartioides*), lagaña de perro (*Caesalpinia gilliesii*), ala de loro (*Monttea aphylla),* jarililla (*Gochnatia glutinosa),* entre otras. Esta formación ocupa generalmente suelos bien drenados de planicies y valles intermontanos, mientras que en los flancos serranos y montañosos la vegetación arbustiva se hace más baja y dispersa. Se observa también la presencia de cactáceas como quisco (*Echinopsis leucantha*) y penca (*Opuntia sulphurea),* varias especies de clavel del aire (género *Tillandsia*) y en las márgenes de los cursos de agua y surgentes, cortaderas (*Cortaderia selloana*) y juncos (*Juncos acutus L. var effusus*).
Desde el punto de vista zoogeográfico se desarrolla aquí la fauna de los ambientes de llanura. La biodiversidad varía en función de la disponibilidad de agua y las condiciones térmicas. Los ejemplares más representativos del ecosistema son mamíferos como el zorro colorado (*Pseudalopex culpeus*), el puma (*Felis concolor*), el guanaco (*Lama guanicoe*), el pichi (Zaedyus pichiy), distintas variedades de cuises, chinchillas, vizcachas y tuco tucos; también existen gran variedad de aves como el cóndor (*Vultur griyphus*), el aguilucho común (*Buteo polysoma*), el pájaro carpintero (*Colaptes melanolaimus),* patos y perdices. Entre los reptiles más representativos se encuentran la iguana colorada (*Tupinambis rufescens*), la falsa yarará (*Pseudotomodon trigonatus*) y la yarará ñata (*Bothrops ammodytoides*).

CAPÍTULO II – Evaluación de los recursos naturales renovables

Una vez identificados y conocidos los recursos naturales renovables del espacio (ecogramas y fichas) se procede a la implementación de técnicas multidimensionales para conocer su estado actual (ver Tabla I).

Tabla I. Ecograma del Fondo de Valle del río. AtuelAutor: Pucciarelli, N. 2011

MICROESCALA : ECOGRAMA DE LAS FORMACIONES DEL MONTE CON INTRUSIÓN PATAGÓNICA – FONDO DEL VALLE DEL RÍO ATUEL											
FORMACIONES VEGETALES	UNIDADES FISONÓMICAS	GEOFORMA PENDIENTE	ALTURA Y LOCALIZACIÓN	GRUPO DE FACTORES ECOL. OBSERV. 05/12/13	ESTRATOS Y COMPOSICIÓN FLORÍSTICA	SUELO	FAUNA NATIVA ASOCIADA	PROCESOS NATURALES	ACTIVIDADES ANTRÓPICAS ACTUALES Y POTENCIALES	IMPACTO ANTRÓPICO	GEOECOSISTEMA ASOCIADO
Vegetación arbustiva de fondo de valle con *Larrea divaricata, Larrea nítida, Cercidium praecox, Capparis atamisquea* y otras.	Grupo de formaciones de arbustos medianos y altos	Fondo de valle	Altura: 772 msnm Lat. Sur: 34º49'00.7" Long. Oeste 68º29'58.1"	Valle con agua superficial (Río Atuel). Suave pendiente hacia el curso del río, presencia de numerosos uadis, Suelo mixto: arena, arcilla y limo, con presencia de materia orgánica. Presencia de cactáceas.	Tres estratos: dos arbustivos, uno alto de Jarilla, Chañar y Atamisque (2.5 m) y otro bajo de Llaullín y Espina de pescado (0.80 m), y un herbáceo de gramíneas. Cobertura 50%.	Mixto con disponibilidad de agua superficial	No se observa directamente	Erosión y transporte de materiales desde las zonas positivas	Turismo (lugares de acampada, cabañas y hoteles), actividades recreativas y deportivas (rafting, cabalgatas, trekking, etc), generación de energía.	Modificación de la vegetación natural, introducción de especies arbóreas: álamo, sauce, eucalipto, aguaribay, acacia, paraíso y pino. Presencia de basura.	Oasis Sur, ciudad de San Rafael, distrito El Nihuil, Valle Grande.

Los elementos fauna, flora, clima, topografía, suelo, disponibilidad de agua y paisaje son analizados simultáneamente a partir de la implementación de dos matrices, una que representa el estado más cercano al óptimo natural del espacio -espacio testigo- y la otra la situación real -espacio real- (ver Tablas II y III). Esta idea está basada en la matriz de insumo/producto la cual considera a la naturaleza como una fábrica (Fundación Bariloche y PNUNA, 1996).

Con la implementación de estas técnicas se pueden identificar las relaciones ecosistémicas que deberían darse en el espacio si este estuviese mínimamente modificado por el accionar antrópico. Una vez obtenidos estos datos se procede a elegir una zona de tránsito permanente en la margen noroeste del río y se aplica la misma metodología (ver matriz espacio real). Luego comparan los resultados para obtener así el grado de degradación de los recursos naturales renovables presentes en el área. Ambos sistemas ecológicos, el testigo y el real, están en el fondo del valle del río Atuel y se hallan a no más de 1 Km. de distancia entre sí, la diferencia sólo radica en la margen analizada.

En estas matrices se expresan los dadores ecosistémicos en el eje vertical y los receptores en el horizontal. La información inicial de las relaciones, cualitativa, es convertida a cuantitativa a partir de la adjudicación numérica, a cada relación le corresponde 1. Se valoran, también, estas relaciones en positivas (naturales o con tendencia a equilibrar al ecosistema) colocándoles números positivos, y negativas (antrópicas o tendientes a desequilibrar al ecosistema) otorgándoles numeración negativa. Luego se suman las cifras de cada casillero y se obtiene el valor total de cada elemento tanto en la matriz testigo como en la real. Así se consigue el primer nivel de relaciones: $R1= \Sigma (Xt - Xr)$, Xt representa el valor de cada elemento en el espacio testigo y Xr en el espacio real. Posteriormente a los totales del espacio testigo se le restan los

valores del primer nivel de relaciones y obteniéndose el segundo nivel de relaciones: R2= Et – R1, Et representa los totales de cada elemento del espacio testigo. Esto expresa la evaluación de los recursos naturales renovables, es decir que expone las interacciones ecosistémicas que cada elemento pierde cuando el valor es positivo, o que preserva en caso de que el valor sea 0 situación ideal ya que demostraría el correcto funcionamiento de la naturaleza como una fábrica.
Una vez obtenidos los valores totales de la evaluación se establecen intervalos de clase para conocer el grado de pérdida de interacciones ecosistémicas, se llega así a cuatro clases: Baja, Media, Alta y Muy alta.

Tabla II. Matriz de evaluación de los recursos naturales. Espacio testigo. Autor: Pucciarelli, N. 2011

		ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA							**Uso actual**	**Total de interacciones del espacio óptimo**
		FAUNA	**FLORA**	**CLIMA**	**TOPOGRAFÍA**	**SUELO**	**DISP. DE AGUA**	**PAISAJE**		
ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA	**FAUNA**	Competencia Reproducción Alimento Colaboración	Propagación Abono	Microclima	Remoción por animales nativos	Nutrientes Aireación Remoción Favorece el ciclo de minerales	Infiltración	Leve impronta	Safari fotográfico Esparcimiento	
	Total	4	2	1	1	4	1	1	2	16
	FLORA	Alimento Hábitat Sombra	Reproducción Parasitismo Colaboración Competencia	Microclima	Fijación Retención del agua Microgeomorfología	Nutrientes Retención Infiltración Aireación	Retarda el ciclo el agua	Fisonomía arbustiva densa	Safari fotográfico Esparcimiento	
	Total	3	4	1	3	4	1	1	2	19
	CLIMA	Adaptación a las zonas áridas	Adaptación a las zonas áridas	Procesos climáticos a diferentes escalas	Importantes modificaciones	Edafogénesis	Elevada evaporación	Fisonomía Estructura Distribución Límites	Energía solar	
	Total	1	1	1	1	1	1	4	1	11
	TOPOGRAFÍA	Hábitat	Modificación de la distribución	Microclima	Procesos en el cambio de las formas	Procesos edafogenéticos o morfogenéticos	Velocidad de escurrimiento	Fisonomía Límites	Educación Recreación	
	Total	1	1	1	1	1	1	2	2	10
	SUELO	Sustrato Hábitat	Soporte Nutrición Humedad	Microclima	Fisonomía propia	Procesos edafogenéticos o morfogenéticos	Débiles procesos de transporte	Sustrato Fisonomía	Recreación Educación	
	Total	2	3	1	1	1	1	2	2	13

	DISP. DE AGUA	Bebida Hábitat	Nutrición Desarrollo vegetal Propagación Mayor densidad	Microclima	Modelado testigo y actual	Humificación Formación Nutrición Erosión	Balance hídrico	Estructura Fisonomía	Riego Consumo Actividades recreativas	
	Total	2	4	1	1	4	1	2	3	18
	PAISAJE	Coincidencia entre límites naturales y artificiales	Coincidencia entre límites naturales y artificiales	Modificación positiva del microclima	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Cuenca	Procesos biogeoecológicos	Educación Recreación Investigación	
	Total	1	1	1	1	1	1	1	3	10

Tabla III. Matriz de valoración de los recursos naturales. Espacio real. Autor: Pucciarelli, N. 2011

		ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA							**Uso actual**	**Total de interacciones del espacio óptimo**
		FAUNA	**FLORA**	**CLIMA**	**TOPOGRAFÍA**	**SUELO**	**DISP. DE AGUA**	**PAISAJE**		
ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA	**FAUNA**	Competencia Reproducción	Propagación			Disminución del aporte de nutrientes			Esparcimiento	
	Total	2	1	0	0	-1	0	0	1	3
	FLORA	Alimento Sombra Disminuidos	Reproducción Parasitismo Colaboración Competencia	Microclima modificado	Fijación del suelo y retención del agua disminuidos	Nutrientes, retención, infiltración y aireación débiles		Fisonomía arbustiva rala		
	Total	-2	4	-1	-2	-4	0	-1	-1	-7
	CLIMA	Adaptación a las zonas áridas	Adaptación a las zonas áridas de especies introducidas	Procesos climáticos a diferentes escalas	Importantes modificaciones	Edafogénesis	Elevada evaporación	Fisonomía		
	Total	1	-1	1	1	1	1	1	0	5
	TOPOGRAFÍA	Hábitat modificado	Modificación de la distribrución	Microclima	Procesos en el cambio de las formas	Procesos edafogenéticos disminuidos	Escurrimiento	Fisonomía modificada	Recreación	

	Total	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	2
	SUELO	Degradación del hábitat y del sustrato	Soporte y nutrición disminuidos	Microclima alterado	Fisonomía modificada	Procesos edafogenéticos disminuidos	Débiles procesos de transporte	Fisonomía modificada	Recreación	
	Total	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	1	-8
	DISP. DE AGUA	Bebida	Nutrición Desarrollo vegetal	Microclima	Modelado testigo y actual	Humificación Erosión lineal	Balance hídrico	Estructura Fisonomía	Riego Consumo Actividades recreativas	
	Total	1	2	1	1	2	1	2	3	13
	PAISAJE	No coinciden los límites naturales y artificiales	No coinciden los límites naturales y artificiales	Modificación positiva del microclima debido a especies arbóreas introducidas	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Cuenca	Procesos biogeoecológicos	Educación Recreación Investigación	
	Total	-1	-1	-1	1	1	1	1	3	4
	SUELO	Degradación del hábitat y del sustrato	Soporte y nutrición disminuidos	Microclima alterado	Fisonomía modificada	Procesos edafogenéticos disminuidos	Débiles procesos de transporte	Fisonomía modificada	Recreación	
	Total	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	1	-8
	DISP. DE AGUA	Bebida	Nutrición Desarrollo vegetal	Microclima	Modelado testigo y actual	Humificación Erosión lineal	Balance hídrico	Estructura Fisonomía	Riego Consumo Actividades recreativas	
	Total	1	2	1	1	2	1	2	3	13
	PAISAJE	No coinciden los límites naturales y artificiales	No coinciden los límites naturales y artificiales	Modificación positiva del microclima debido a especies arbóreas introducidas	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Coincidencia entre los límites naturales y artificiales	Cuenca	Procesos biogeoecológicos	Educación Recreación Investigación	
	Total	-1	-1	-1	1	1	1	1	3	4

Tabla IV. Matriz de evaluación de los recursos naturales. Autor: Pucciarelli, N. 2011.

		ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA							Uso actual Total del primer nivel de relaciones R1=Σ (Xt – X r)	Total de interacciones del espacio Resultado de la óptimo evaluación de los rec. naturales R2= Et – R1 R2
		FAUNA	FLORA	CLIMA	TOPOGRAFÍA	SUELO	DISP. DE AGUA	PAISAJE		
ELEMENTOS DEL ECOSISTEMA	FAUNA	2	1	1	1	3	1	1	1 11	16 5 -11
	FLORA	1	0	0	1	0	1	0	1 4	19 – 4 15
	CLIMA	0	0	0	0	0	0	3	1 4	11 – 4 7
	TOPOGRAFÍA	0	0	0	0	0	0	1	1 2	10 – 2 8
	SUELO	0	1	0	0	0	0	1	1 3	13 – 3 10
	DISP. DE AGUA	1	2	0	0	2	0	0	0 5	18 – 5 13
	PAISAJE	0	0	0	0	0	0	0	0 0	10 – 0 10

Tabla V. Evaluación de los recursos naturales renovables en función de sus pérdidas ecosistémicas. Autor: Pucciarelli, Natalia 2012.

	BAJA 1 a 4	MEDIA 4 a 9	ALTA 10 a 14	MUY ALTA 15 a 19
Fauna				
Flora				
Clima				
Topografía				
Suelo				
Disponibilidad de agua				
Paisaje				

De la tabla que antecede podemos concluir que todas las interacciones ecosistémicas de los elementos que conforman el ecosistema del Fondo del Valle del Río Atuel se encuentran disminuidas. La merma en la cantidad de relaciones varía desde media a muy alta, en la primera clase tenemos a la fauna, el clima y la topografía, en la clase alta encontramos al suelo, la disponibilidad de agua y el paisaje, mientras que en la muy alta sólo tenemos a la flora. Podemos decir entonces que de los recursos naturales analizados uno de los menos afectados es la Fauna, mientras que el más degradado es la Flora.

El paisaje natural se ve transformado en todos sus elementos, pero esto se hace principalmente visible en la flora, modificada no sólo en la cantidad de individuos vegetales, sino también en sus estratos, grado de cobertura y fisonomía. Esta simplificación de las formaciones vegetales es el fiel reflejo del deterioro del ecosistema en su totalidad. El ecosistema real acusa modificaciones y poco se parece al testigo como consecuencia de la falta de manejo y planificación del área.
La fauna se presenta como uno de los recursos menos afectados, pero este resultado es relativo, es decir que sólo refleja parcialmente la realidad. Esto se debe a que este elemento, por sus hábitos y natural movilidad, es difícilmente analizable en forma directa, lo que no quiere decir que no se encuentre notablemente alterado. Sin lugar a dudas la actividad antrópica genera la modificación del hábitat natural de la mayor parte de las especies nativas y las obliga a migrar a zonas alejadas del curso de agua. Por ello siempre tiene una muy débil impronta en el espacio.

CAPÍTULO III – Antecedentes en la modificación del espacio
El aprovechamiento hídrico y sus consecuencias

El primer antecedente claro de modificación del espacio natural lo encontramos con la creación del dique compensador Valle Grande inaugurado en 1966, segunda -tanto en antigüedad como en tamaño- de las 4 cinco obras de regulación hídrica sobre el curso medio del río Atuel. Posee una longitud de 300 m, una altura máxima desde su fundación de 125 m, capacidad total de 164 hm3, capacidad de descarga de 300 m3/s y un espejo de agua con una superficie de 508 ha. Su construcción generó cambios en el normal escurrimiento del agua superficial, y en la distribución y disponibilidad del agua subterránea. Presta servicio de riego a aproximadamente 80.000 has.
Con el transcurso del tiempo este espejo de agua y el valle que le sigue se constituyen en sitios de interés turístico tanto provincial como nacional. La instalación de complejos, especialmente en la margen norte del río se desarrolló espontáneamente, sin planificación. De manera lineal se fueron instalando distintos emprendimientos turísticos destinados al esparcimiento y a la práctica de actividades deportivas como rafting, cabalgatas, escalada en roca, rapel, tirolesa, kayak, canotaje, trekking, entre otras. Según datos proporcionados por la Municipalidad de San Rafael el primer emprendimiento turístico en la zona lo constituye el Hotel Valle Grande, seguido por el camping Condorí (actual Camping La Ensenada), El Sauce y Club de Pescadores.
Sistemáticamente se han ido reemplazando especies autóctonas por introducidas, la mayoría de ellas con el objetivo de brindar mayores comodidades a los visitantes. Algunas de las especies forestales presentes en la actualidad son: álamo carolino (*Populus deltoides*), sauce (*Salix babylonica*), eucalipto (*Eucalyptus spp.*), aguaribay (*Schinus molle*), acacia (*Acacia visco*), paraíso (*Melia azedarach*). Esta situación acarrea una peligrosa simplificación del ecosistema y con ella aumenta la vulnerabilidad de este supraorganismo para sobrevellar determinadas circunstancias naturales o antrópicas. Cada organismo vivo desempeña un papel dentro del ecosistema, su eliminación desequilibra al mismo poniéndolo en una situación de riesgo constante y minimizando su efectividad.
En lo que respecta a la población asentada de manera permanente en el espacio se puede decir que no se cuenta con datos precisos, esto se debe a que es un sector pequeño dentro del distrito El Nihuil. A pesar de ello, se calcula que podría ascender a unas 150 personas, cantidad que se duplica en temporada alta por la llegada de trabajadores temporales a los distintos emprendimientos turísticos.

La actividad turística

El departamento de San Rafael es uno de los más importantes a nivel turístico de la provincia de Mendoza, es el tercero en importancia en función de las plazas de hoteleras luego de Capital y Malargüe respectivamente. Cuenta con varios circuitos turísticos, siendo el más elegido el N° 1 que incluye al espacio en estudio. Sus hermosos paisajes y la posibilidad del disfrute de la naturaleza se encuentran entre las causas que citan los turistas al visitarlo.

Según datos aportados por la Dirección de Turismo del departamento de San Rafael el origen de los turistas que llega al departamento es principalmente nacional, en su mayoría de la provincia de Buenos Aires (71%), seguidos por visitantes de la ciudad de Mendoza, Santa Fe, Corrientes, La Pampa, San Luis y Neuquén. Los promedios de permanencia son de entre cinco y siete días, y la mayoría arriba en vehículo particular.

El calendario turístico de la zona abarca todo el año, pero la época con mayor concentración de la actividad es la estival. La temporada alta se registra aproximadamente desde mediados de diciembre hasta Semana Santa. Los sitios más visitados de Valle Grande son el dique homónimo y la Virgen del Valle. La práctica de algunas actividades vinculadas al turismo de aventura es otro gran atractivo del lugar.

La cantidad de turistas que llegan a Valle Grande se ha visto incrementada de manera notable en los últimos años debido a factores como el auge del turismo de aventura y al aumento de los paseos de fin de semana. Si bien no se cuenta con datos precisos sobre la cantidad de turistas que llegan específicamente a Valle Grande se puede afirmar, según información proporcionada por la Dirección de Turismo de San Rafael, que del total que ingresan al departamento el 80% elige como destino final a Valle Grande y el 20% restante lo visita a modo de excursión. Es por ello que se debe analizar en profundidad la forma en que se maneja el recurso turístico en la actualidad, para determinar estrategias que lleven conservar el paisaje natural.

En el año 2005 la Subsecretaría de Turismo de San Rafael realizó una encuesta a los turistas que visitaban el departamento, se encuestaron aspectos como: sexo, edad, motivos de la elección del destino, cantidad de días que se quedará, tipo de turismo a realizar, tipo de actividad de aventura que elegiría, entre otras. Los gráficos que siguen muestran algunos de estos aspectos. La mayoría de ellos tenía entre 21 y 30 años, la mitad llegó motivados por el paisaje y la naturaleza, gran parte optó por la práctica de raffting como turismo de aventura.

La guía de prestadores turísticos ofrecida a los visitantes por la Subsecretaría de Turismo de San Rafael muestra la importancia que el espacio en estudio tiene para esta actividad. En ella se detalla la oferta de: Alojamiento (Hoteles, Apart hotel, Hospedajes, Cabañas, Albergues, Hosterías, Hostel, Viviendas en alquiler, Alojamientos rurales, Posadas y Campings), Gastronomía (Restaurantes y parrillas, Pizzerías y sandwicherias); Servicios (Líneas aéreas, Empresas de viajes y turismo, Prestadores de servicio de aventura, Transporte colectivo de pasajeros, Renta de autos) y Otros. En cuanto al primer aspecto, Alojamiento, Valle Grande cuenta con 2 de los 25 hoteles registrados, ambos de 3 estrellas; 27 de las 57 cabañas; 8 de los 13 campings; no registrándose ningún elemento en el resto de las categorías. En lo referente a Gastronomía se ubican en el espacio 4 de los 36 restaurantes y parrillas, y sólo 1 de las 30 pizzerías y sandwicherias. Del resto de los servicios el de Prestadores de servicios de aventura posee una frecuencia de 18 sobre 29 del total del departamento; el resto no se desarrolla en el lugar.

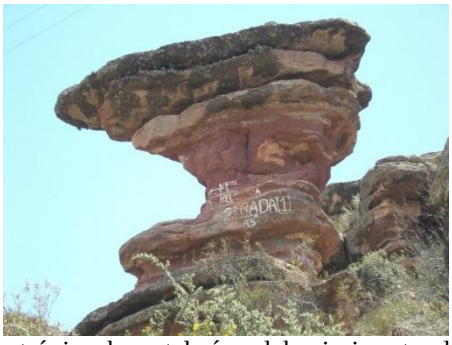
Las empresas que prestan servicios de turismo de aventura son: Saint Joseph, Extremo, Raffeish, Antú, Leufú, Alihuen, Kewen, Banana, El Portal del Atuel, Sport Star, Kintun y Cahuel Mapú. Estas se diferencian no sólo por la estacionalidad de sus servicios, algunas sólo trabajan en temporada alta y otras todo el año (Saint Joseph, Extremo, Raffeish, Portal del Atuel, Sport Star), sino también por la variedad de prestaciones ofrecidas. La principal actividad practicada es rafting, luego le siguen en importancia trekking, rappel y tirolesa.

El turismo y su impacto en el paisaje natural

El turismo es una actividad muy antigua, ampliamente expandida en el mundo y en constante crecimiento. Según la OMT presenta un incremento anual del orden del 6,36%. Ella genera enormes ganancias económicas para algunos lugares, inclusive existen espacios en donde el mayor ingreso de la población está relacionado con la prestación de este servicio. Desde hace algunas décadas se viene insistiendo en la necesidad de un turismo ambientalmente responsable debido a la observación del deterioro de la riqueza natural y cultural que algunos lugares de recepción masiva han experimentado. De allí que surja el

concepto de *ecoturismo*. Entendido, de manera amplia, como entendido el único camino posible para que se conjugue disfrute de la naturaleza con preservación del paisaje natural y cultural.
En el caso de Valle Grande se puede evidenciar un notable incremento inmobiliario, algunas veces no planificado, principalmente la margen NNO del río Atuel. Este aumento se viene dando desde hace aproximadamente 15 años, y en muchos casos esto se ha producido sobre áreas vulnerables y con alto riesgo de inundación. La fachada y la cartelería de los complejos turísticos no siempre respeta los colores ni las formas del entorno natural, la implantación forestal también genera desequilibrios paisajísticos ya que no se han respetado los cánones naturales introduciendo seleccionado especies exóticas.





Fotos 3 y 4. Degradación antrópica de cartelería y del paisaje natural
Fuente: Pucciarelli, N. (2011)

Las actividades turísticas de aventura no reflejan en la actualidad un impacto directo y de considerables dimensiones debido a la temporalidad de las mismas, pero se deberían tomar medidas a nivel municipal para reglamentarlas y ofrecer capacitación ambiental a los proveedores de estos servicios.
Otro aspecto a destacar, y que se conjuga negativamente, es el deficiente sistema de acopio de residuos, no existen contenedores en las áreas abiertas al público en general. La recolección de los residuos es realizada por la municipalidad con frecuencia variable según sea temporada alta o baja, para la primera es de 3 veces por semana y para la segunda de 1 o 2. Para agilizar la tarea y disminuir los problemas asociados a su acopio, desde el municipio se solicita a cada emprendimiento turístico la construcción de un reservorio estandarizado, cerrado con dos puertas (una interna y otra externa), piso de hormigón, paredes de piedra y techo cubierto. Todos los residuos recogidos son transportados al vertedero La Tombina, lugar en donde también se depositan los de la ciudad cabecera del departamento y sus alrededores.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tanto el desarrollo del trabajo como las conclusiones pueden considerarse parciales ya que la investigación se encuentra en la primera fase de elaboración. A pesar de ello puede inferirse tentativamente la validez de las hipótesis planteadas al inicio de la investigación. También es posible acercar algunos resultados parciales a modo de discusión:

- El ecosistema natural del Fondo del Valle del río Atuel es un ejemplo de un espacio con una gran riqueza paisajística y con una enorme variedad de recursos naturales, pero se encuentra modificado por el accionar antrópico. La actividad turística no regulada es el principal agente perturbador del ecosistema natural, lo que causa deterioro en todos los recursos, pero que se evidencia principalmente en la flora nativa.
- El análisis de las condiciones naturales actuales refleja una notable perdida de relaciones ecosistémicas, lo que lleva al empobrecimiento del ecosistema natural en particular y a la degradación del paisaje en general.

Se plantea entonces la necesidad de lograr un desarrollo integral del espacio, que permita disfrutar turísticamente del lugar sin profundizar las alteraciones paisajísticas observadas hasta el momento. Esto

incluiría sin duda un plan de capacitación a emprendedores turísticos y población local en ecoturismo, es decir que se debe buscar a la educación ambiental, formal y no formal, como agente de transformación.
Cabe destacar que las secciones presentadas no se encuentran finalizadas, por ejemplo, en cuanto al diagnóstico geoecológico de los componentes del paisaje natural sólo se ha realizado hasta el momento el reconocimiento y la descripción parcial de sus elementos constitutivos pero no se han correlacionado los datos ni se han corroborado los resultados.

REFERENCIAS

[1] B.R. (1996) *Ecosystem Geography*, New York, Ed. Springer – Verlag, New York, Inc., 204p. (1996)

[2] R.F. y otros. *Mapa de la vegetación de la Provincia de Mendoza (IADIZA), CRICYT – Mendoza, Argentina, Escala 1:1.000.000,* en Atlas Básico de Recursos Ambientales de la Provincia de Mendoza, CFI., Directora: E. M. Abraham, 32 p. (1999)

[3]A.R. y P.N. *Patrimonio natural: técnica para la evaluación de recursos naturales renovables,* en Metodología para la enseñanza e investigación del medio ambiente, CCMA, Mendoza, ECOGEO, pp. 46-60. (2004)

[4] C.H. *El cuaternario del Bloque de San Rafael. Características geomorfológicas - estructurales y riesgo sísmico asociado,* en: Revista 25 años del IANIGLA, CRICYT, Mendoza. (2002)

[5]A.M. y P.N. *La intrusión del paisaje patagónico en Malargüe*, en Rasgos de marginalidad. Diferentes enfoques y aportes para abordar su problemática. Capítulo II. Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras, Mendoza, pp. 55-72 (2013)

[6] F.B.PNUMA. *"Manual de cuentas patrimoniales"*, Fundación Bariloche, México. (1996)

ESTRATEGIAS Y RECURSOS PARA LA EDUCACIÓN FORMAL Y NO FORMAL SOBRE RIESGOS DE DESASTRE

LOS CASOS DE MENDOZA Y SAN LUIS

*Prof. Esp. Silvia Robledo (Directora)**

CCMA Instituto de Geografía

F.F.yL. UNCuyo

ecogeo@ffyl.uncu.edu.ar

Riesgos ambientales – educación – resiliencia- recursos didácticos – prevención

Las ciudades de Mendoza y San Luis poseen variedad de riesgos naturales y antrópicos, sin embargo sus habitantes tienen una conciencia débil. En la provincia de Mendoza las acciones realizadas por los organismos de gestión para incorporar en la sociedad la cultura de la prevención en materia de riesgos son insuficientes. En el caso de San Luis el grado de conciencia es nulo, tanto de los organismos de gestión, que sólo se han preocupado por los incendios forestales, como de la población, que no asume que puede ocurrir un hecho desastroso.

La formación de una cultura de la prevención debe ser prioritaria dentro de la gestión de riesgos de desastre. Es por ello que este grupo de investigación lleva a cabo un proyecto sobre estrategias y recursos para la educación formal y no formal sobre riesgos de desastre.

Se ha elaborado un manual para docentes y capacitadores no formales. A este recurso se agregan juegos didácticos, diseño de estrategias con uso de TICS, un atlas digital, secuencias didácticas para docentes y una guía de supervivencia.

La finalidad es contribuir a la construcción de una sociedad con alta capacidad de resiliencia ofreciendo estrategias y recursos para lograrlo. Se intenta minimizar la brecha entre la teoría y la práctica: se analiza la complejidad de los riesgos asociada a la capacidad de actuar en situaciones de emergencia.

Las etapas de trabajo han sido: 1-Lectura de bibliografía específica y búsqueda de información de diferentes fuentes. 2-Diseño de recursos y estrategias didácticas. 3-Validación en instancias de capacitación.

INTRODUCCIÓN

La región de Cuyo constituye un área del país que está afectada por diversas amenazas ambientales que pueden convertirse en riesgos de desastre y catástrofe. Entre ellas: sismos, aluviones e inundaciones, incendios, vientos fuertes, amenazas tecnológicas y sociales de diferente índole. En el caso del Gran Mendoza, su condición de ciudad- oasis que reúne el 53 % de la población provincial la convierte en una "ciudad – problema" Su sitio la expone a amenazas constantes de sismos, aluviones, viento zonda, entre otros. La alta concentración de sus actividades económicas y la ausencia de un ordenamiento territorial adecuado han desembocado en una ciudad que suma riesgos tecnológicos derivados de sus parques industriales, estaciones de servicio diseminadas por el espacio urbano, entre otras amenazas de origen antrópico. Además el Gran Mendoza se halla en el corredor bioceánico y, por ello, tiene un tráfico constante de sustancias peligrosas. En el caso de San Luis, si bien es una ciudad intermedia, con una población aproximada de 200.000 habitantes,

ha experimentado un crecimiento importante y desordenado en las últimas décadas. La entropía del crecimiento urbano ha incrementado la vulnerabilidad. Incendios forestales sobre el piedemonte de las sierras, inundaciones, tornados, sismos se unen a las amenazas tecnológicas derivadas de sus parques industriales, estaciones de servicio, etc.

Como expresa Lavell "Los centros urbanos comprenden sistemas cuya complejidad aumenta conforme lo hace el tamaño de la ciudad. Este sistema intraurbano, con interconectividad y dependencias en cuanto a roles, funciones, producción, consumo, comercio, vivienda y lugares de trabajo, entre otros; todo entrelazado por complejos sistemas de transporte, distribución de agua, sistemas de electrificación y de alcantarillados, significa un alto grado de vulnerabilidad de la estructura, frente a eventos físicos extremos, ya sean extensos o localizados…". [1]

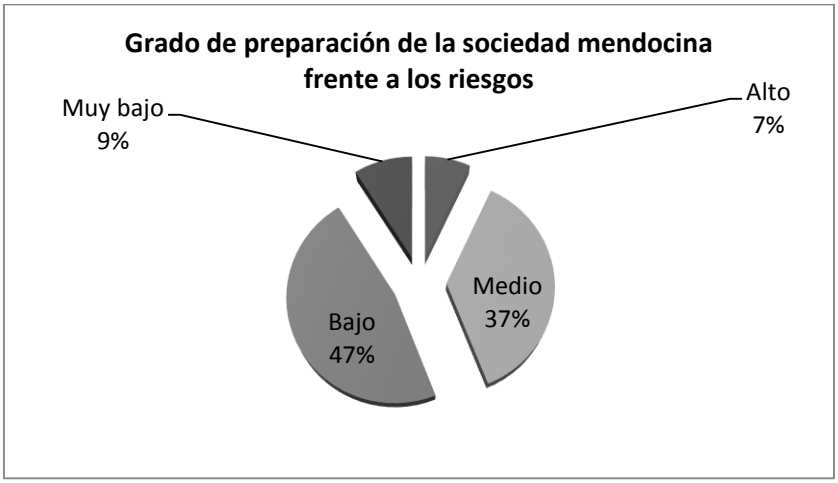
DESARROLLO EXPERIEMENTAL

El diagnóstico realizado

Con la finalidad de evaluar el grado de conocimiento y compromiso de la población frente a riesgos de desastre se realizó un diagnóstico en el periodo 2011-2013. En el mismo, se advierte que la población no se siente preparada para enfrentar una emergencia y mucho menos para incorporar el riesgo de desastre a su vida cotidiana.

En el caso de San Luis, el 72% de los encuestados expresaron que el grado de preparación no era adecuado. Los que opinaron mejor dijeron que San Luis tiene un grado medio de preparación (el 28% restante). Ninguno consideró que el grado de conocimiento era satisfactorio.

En el caso de Mendoza la valoración que hicieron los encuestados con relación a la preparación que tiene la sociedad para enfrentar riesgos de desastre o catástrofe se asemeja bastante a la realidad. La mayoría calificó a la misma como baja o media (ver Figuras. 1 y 2)



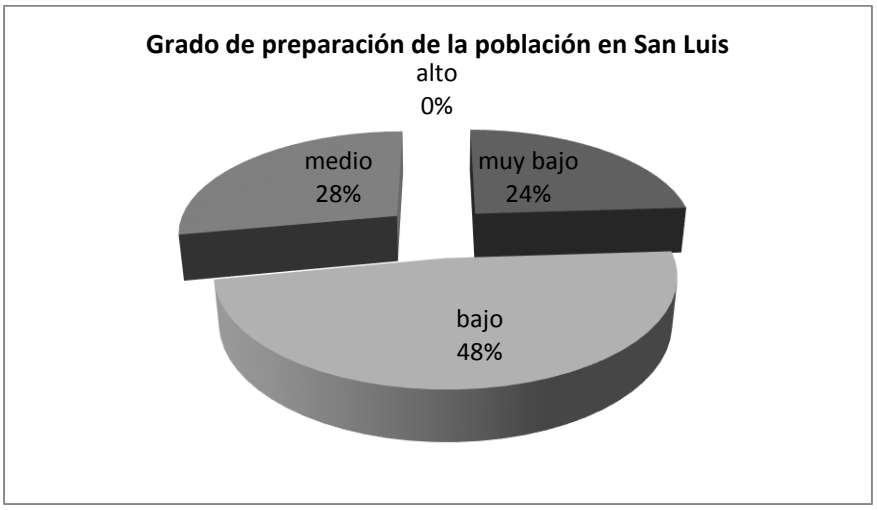


Fig. 2 y 3 Preparación de la sociedad ante los riesgos ambientales

Fuente: Silvia Robledo, sobre la base de las encuestas realizadas

Los testimonios fueron elocuentes: *"Hace falta más educación", "se debería capacitar en las escuelas y comunidades barriales", "Los simulacros deberían ser más completos y tener mayor frecuencia", "No estamos preparados, los simulacros los tomamos como chistes", "El Gobierno debe hacer más campañas*". [2]

El rol de la educación sobre riesgos de desastre

Una de las herramientas esenciales de la gestión de riesgos de desastre es la educación. Ésta implica brindarle conocimientos teóricos al ciudadano como una forma de prevenir y, además, la preparación práctica de éste para que pueda enfrentar una emergencia.

Asimismo, posibilita indagar en los procesos histórico-políticos, socioeconómicos que hayan facilitado la producción de riesgos de desastre.

"La educación para la gestión del riesgo, es de carácter compleja y sistémica, por lo cual, no es un tema a tratar, sino una dimensión de la vida cotidiana que exige la formación integral del ser humano desde la ética, la ciencia, con conciencia de sí mismo, de los otros y de su lugar en el planeta". [3]

La educación permite capacitar para la resiliencia. En un sentido estrictamente técnico, se entiende por ella, al proceso de adaptarse adecuadamente a la adversidad, a un trauma, una tragedia, una amenaza, o hasta fuentes de tensión importantes, como conflictos familiares, problemas serios de salud o factores estresantes del trabajo o financieros. Significa "rebotar" como un balón o un resorte después de una experiencia difícil.

La educación sobre riesgos de desastre es clave para lograr la capacidad de resiliencia, ya no a partir de una experiencia traumática previa (terremoto, aluvión, desastre tecnológico), sino para disminuir las consecuencias de estos eventos o evitarlos, cuando sea posible.

La resiliencia incluye pensamientos y acciones que pueden ser aprendidas y desarrolladas por cualquier persona, organización o comunidad.

La educación sobre riesgos de desastre logra que las personas estén mejor preparadas para actuar, tanto en la emergencia como en la fase pos catástrofe, pero también contribuye a formar ciudadanos participativos y comprometidos con su comunidad.

Normalmente el educador se encontrará con diversos públicos a los que dirigirá su programa: las personas que ignoran el tema y por lo tanto no saben actuar en una emergencia, ni están capacitados para participar activamente en la prevención. Luego hay un sector de la comunidad que tiene conocimientos, es decir, está informado, pero no le interesa el tema o no quiere participar, por último estará la porción menor de la población que es un público formado, participativo, crítico y con capacidad de acción. El proceso educativo debe minimizar los dos primeros grupos y maximizar el tercero. La educación formal y no formal contribuyen a incorporar esta cultura de la prevención. (ver Figura 3)

"Se considera muy importante que se generen más estudios sobre cómo operacionalizar la educación para la prevención de riesgos a desastres, en pro de lograr una cultura de la prevención que, en suma, es pasar de la educación de "papel" a la educación para una "mejor calidad de vida". [4]

"Las actuales propuestas educativas apuntan hacia una interpretación incompleta sobre los riesgos y los desastres, que a su vez distorsiona el significado y alcances de la prevención. Se privilegia una de las dimensiones prácticas del problema –la respuesta ante situaciones de emergencia– y se pierde de vista el imperativo de desarrollar acciones sociales integrales al respecto. Por ello, es urgente desarrollar un nuevo enfoque educativo, que permita el análisis holístico de los riesgos a desastres". [5]

Sobre esta base y teniendo en cuenta las experiencias llevadas a cabo en otros países se realizaron dos proyecto, financiados por SECTyP, UNCuyo, sobre estrategias y recursos para la educación formal y no formal sobre riesgos de desastres.

En el primero se elaboró un manual sobre riesgos ambientales del Gran Mendoza y Gran San Luis; en el segundo se está trabajando sobre otros recursos didácticos y selección de estrategias para la educación formal y no formal (ver Figura 4)

Manual de educación sobre riesgos de desastre

Se elaboró un manual en el que se incluyeron los siguientes riesgos: sismos, inundaciones, vientos (zonda y tornados), incendios forestales y riesgos tecnológicos. El texto aporta una mirada local y regional ya que se contextualizó cada riesgo en los espacios geográficos seleccionados. [6]

Se pretende ofrecer una herramienta para la enseñanza, tanto formal como no formal de los riesgos ambientales que pueden afectar tanto al aglomerado de Mendoza como al de San Luis.

El manual está dirigido a los docentes, a los agentes de extensión que quieran capacitar a la comunidad en el marco de la educación no formal y a la población, en general. A través de un lenguaje sencillo y de ejemplos locales se pretende llegar a un público amplio que a partir de su lectura se informe, se ocupe y transfiera a otras personas o grupos estos temas.

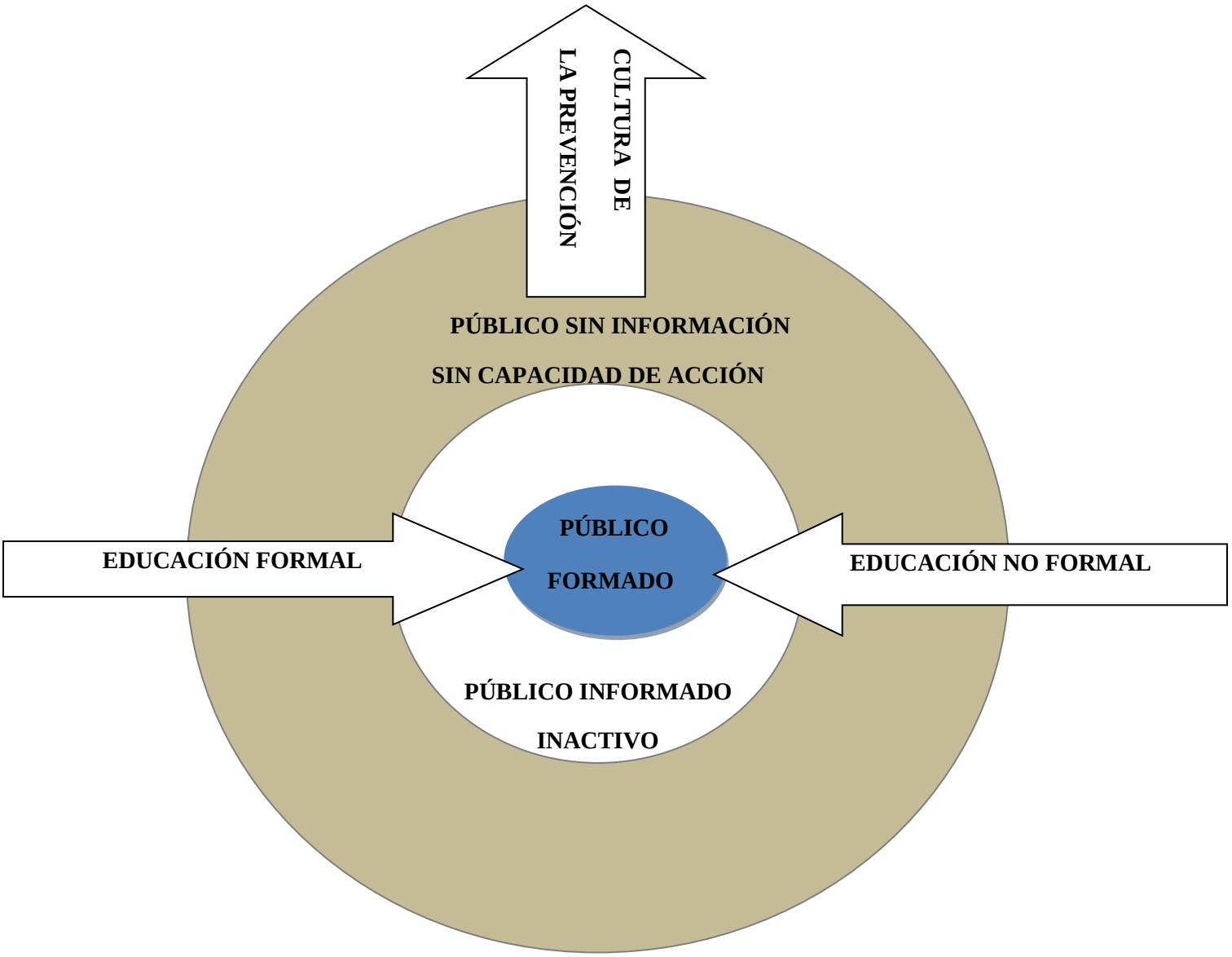


Fig. 3 Proceso de la educación sobre riesgos de desastre

Fuente: Silvia Robledo, sobre la base de Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja www.ifrc.org [7]

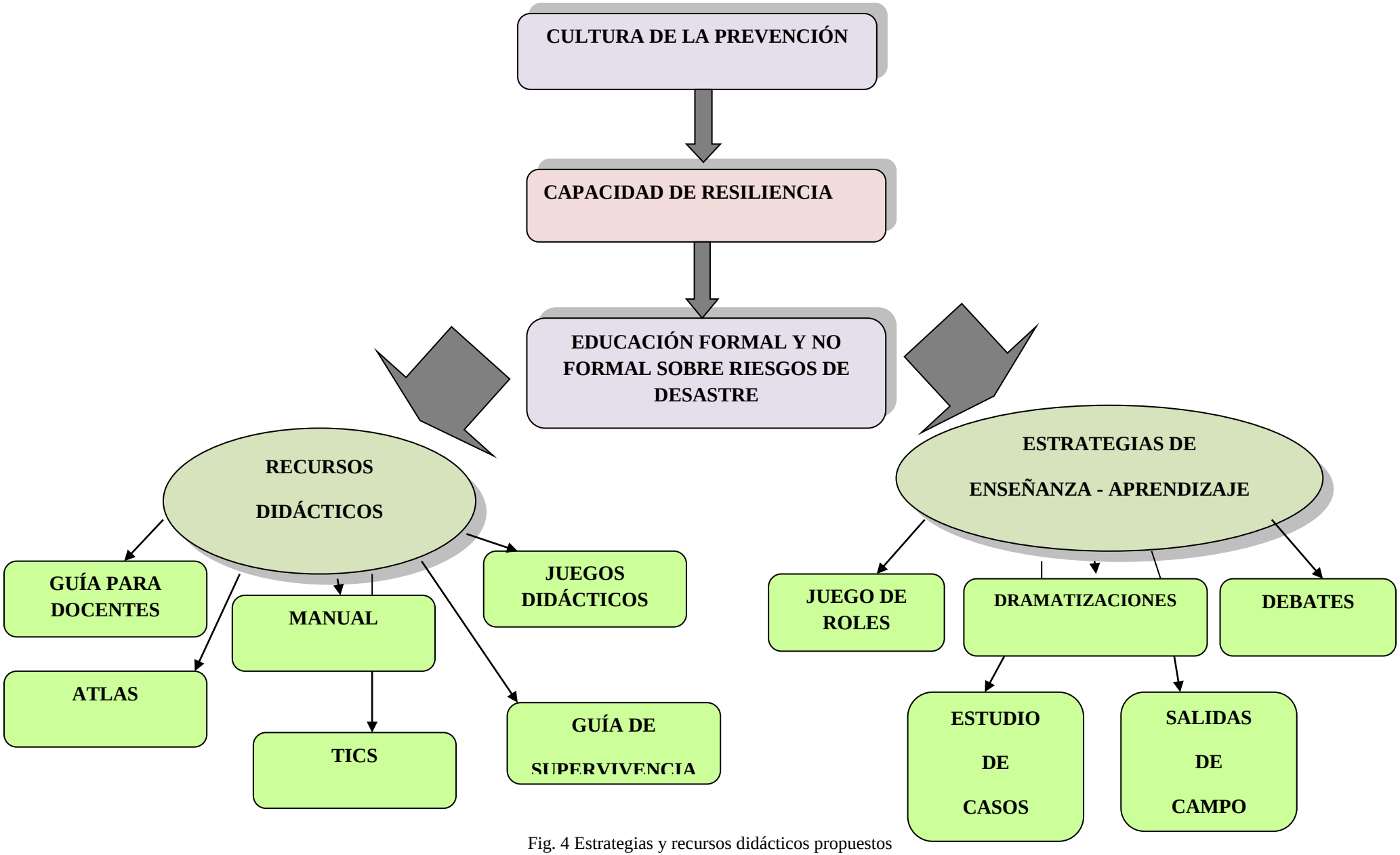


Fig. 4 Estrategias y recursos didácticos propuestos

Juegos didácticos

El juego como estrategia didáctica permite desarrollar en los estudiantes valores y habilidades que conduzcan a un mejor aprendizaje. Es posible promover un cambio de actitudes y conductas a través de actividades lúdicas relacionadas con la toma de conciencia y preparación ante posibles eventos desastrosos, lo que implica desarraigar conductas inapropiadas para construir nuevas.

Se comenzó trabajando fundamentalmente juegos vinculados con el riesgo sísmico para ser utilizados en la educación formal y no formal. Actualmente se ha incluido viento zonda, inundaciones y aluviones, Se han diseñado juegos de patio, de mesa, virtuales, etc. Entre ellos se mencionan: juego de la ruleta, salva tu vida, curiosísimos, crucipalabras, sismos: ¿cómo actuar?, preparados, listos, ya. [8]

Es interesante el proceso con el que se construyeron estos juegos ya que participaron alumnos de cuarto y quinto año de la escuela secundaria San Vicente de Paul (San Martín) y fueron validados por alumnos de escuelas primarias de sexto y séptimo grado. (ver Foto 1y 2)





Foto 1y 2 Validación de juegos con alumnos de nivel primario

Fuente: Virginia Brega

Guías para docentes

La guía tiene como fin contribuir con herramientas y secuencias didácticas para que los docentes puedan ofrecer medios para abordar temas de riesgo, concientizando a la vez a estudiantes secundarios y terciarios e interesados en general sobre esta problemática y cómo actuar de manera responsable. No constituye un conjunto de propuestas cerradas sino que las mismas buscan estimular la creatividad de los educadores.

La guía responde a la realidad regional, la cual, como se explicó, se compone de una determinada trama de situaciones de riesgo.

Guía de supervivencia

La educación, debe más que nunca "enseñar para la vida". Por ello se decidió incluir una guía de supervivencia que tiene por objetivo generar en el educando una actitud de cuidado y protección de su propia vida y de la de quienes lo rodean.

Se pretendió abordar la temática de supervivencia, supervivencia urbana y eficiencia urbana y brindar fundamentos para que esta temática se inserte en currículos escolares. Además permite a los docentes y capacitadores tener herramientas sencillas para ser usadas en caso de emergencia.

Estrategias didácticas con el empleo de Tics

Las tecnologías de la información y comunicación han atravesado todos los ámbitos de la vida. El programa Conectar igualdad supone la existencia de una computadora por alumno. Con esta herramienta se puede trabajar diferentes riesgos ambientales utilizando software, entre ellos el Google Earth y el 2Mp. Se elaboran propuestas con y sin conexión a la red para que todos los docentes puedan incorporar este recurso.

Atlas de riesgos de desastre

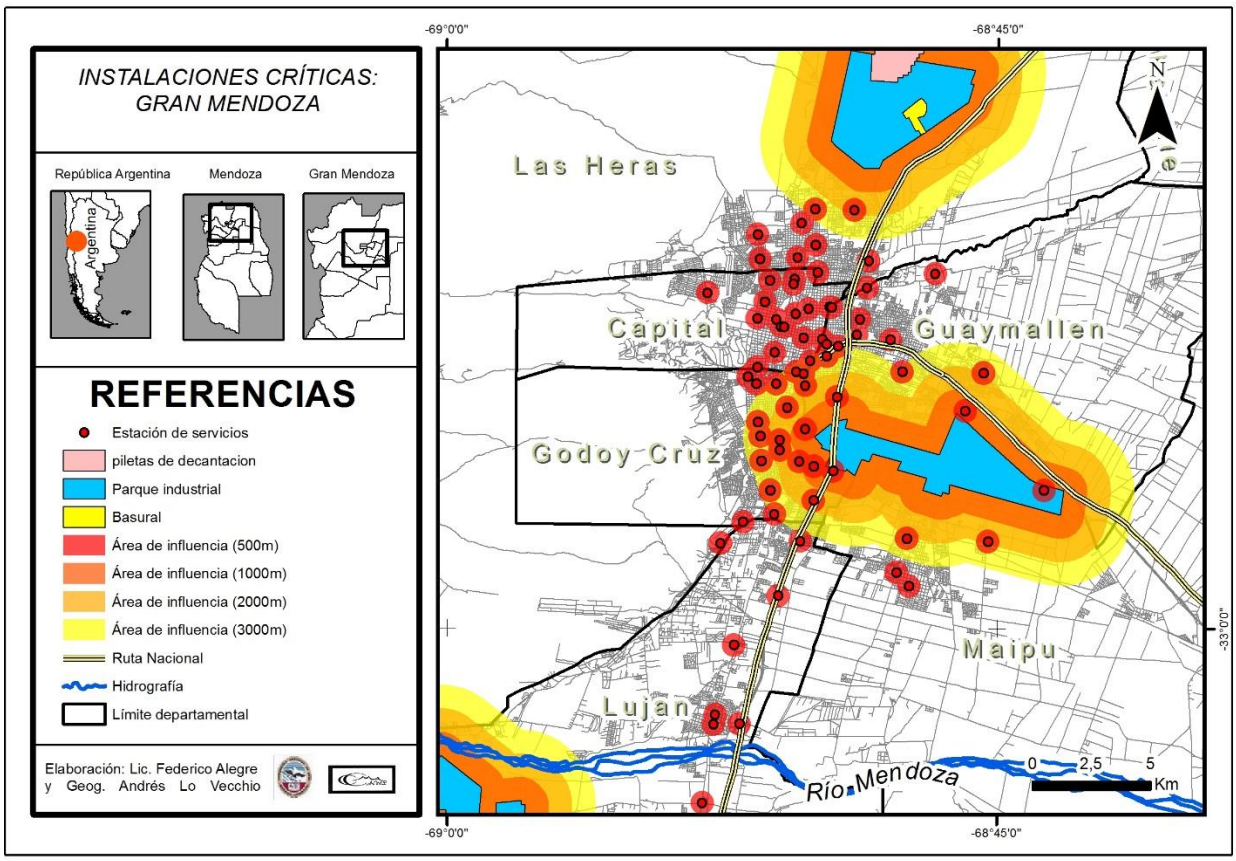
Entre los temas más abordados en la investigación sobre gestión de riesgo se halla la recopilación de información; su representación a través de mapas. Por ello se consideró importante generar un atlas que reuniera información sobre amenazas, vulnerabilidades, riesgos e instalaciones críticas para las zonas estudiadas. Ya se habían elaborado cartas temáticas que se incluyeron en el manual, ahora se trabaja en la realización de un atlas más completo. (ver Figura 5)

El atlas es útil, tanto para la gestión sobre riesgos de desastre, como para la enseñanza.

RESULTADOS

Se generaron instancias de capacitación para validar las estrategias y recursos elaborados. Se elaboró un proyecto educativo denominado **Aprendamos a bajar la vulnerabilidad frente a los peligros en San Luis,** pionero en la provincia mencionada. Dentro de las tareas efectuadas se menciona la capacitación sobre Primeros auxilios y RCP y manejo del fuego en la escuela Paula D. de Bazán. Se diseñó y elaboró un plan de evacuación con el asesoramiento del Programa San Luis solidario y de Defensa Civil, entidades dependientes del Ministerio de Seguridad del Gobierno de esa provincia. (ver Foto 3)

El proyecto educativo: **Una escuela comprometida con la prevención sísmica. Jugamos, aprendemos, prevenimos** ha permitido un proceso de enseñanza aprendizaje que ha incluido alumnos de primaria y secundaria de la escuela Instituto San Vicente de Paul, San Martín, Mendoza. En el proyecto participaron alumnos de quinto año del nivel secundario y alumnos de 6to y 7mo. Grado de nivel primario.



Figs. 5 Ejemplo de carta elaborada para el atlas

Fuente: Andrés Lo Vecchio y Federico Alegre

Los estudiantes de secundaria diseñan propuestas para los alumnos de primaria, principalmente juegos didácticos. Además trabajaron con la comunidad del barrio donde está la escuela bajo la propuesta de armar la mochila correctamente.



Foto 3 Ejercicios realizados en la Escuela Paula B. Bazán, San Luis.

CONCLUSIONES

La realización de materiales educativos se considera valiosa y es parte de la gestión del riesgo de desastre.

Las capacitaciones realizadas han sido fructíferas, aunque insuficientes. Queda un largo camino en la generación de productos que no sólo incorporen conocimientos teóricos y prácticos, sino, que, fundamentalmente, problematicen los contenidos para pasar de un público inactivo a uno participativo y crítico, para ello hay que incorporar con más fuerza aquellas variables del riesgo vinculadas con los procesos, los actores sociales y agentes responsables.

La educación sobre riesgos de desastre se encuadra en "educar para la vida" y por ello su inclusión es fundamental.

*Equipo de trabajo: Robledo, S., Alessandro, M., Espinosa, D., Oliveira, M., Grasso, C., Brega, V., Pucciarelli, N., Bianco, F., Alegre, F., Lo Vecchio, A., Rocchi, L., Pampillón, C., Chiappa, E., Cicconi, L., Bajuk, M., Guerra, M.

REFERENCIAS

[1]*Lavell, A.* (2002) Gestión de riesgos ambientales urbanos**,** FLACSO, La Red, www.desenredando.org

[2]*Robledo, S., Oliveira, M. y Espinosa, D*. (2013**)** Educación para prevenir y enfrentar catástrofes ambientales en Cuyo: Diagnóstico**,** en XXII Encuentro Nacional de Profesores de Geografía. XXII encuentro Nacional de Metodología de la Enseñanza de la Geografía y VII Jornadas Regionales de Turismo y Geografía. www.isnsc.com.ar/.../EJE 4

[3]*Alpizar Marín, M. E*. (2009) Educación y reducción de riesgos de desastres en Centroamérica, Gestión de riesgo CECC/SICA, Vol. 50, ISBN 978-9968-633-07-9, Costa Rica.

[4]*Arauz Muñoz, J. y Montero, C*. (2006) Reflexiones sobre la educación de la prevención del riesgo a desastres Costa Rica, en Tecnología en marcha, Vol. 21-1, PP 202-214

[5]Ibidem

[6] *Robledo, S. ET. AL*, (2015) Manual de Educación sobre riesgos ambientales. El caso de Cuyo, Mendoza, E-book ISBN 978-950-774-258-3 , www.geografiaccma.blogspot.com

[7]*Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja* (2011) Guía para la sensibilización y educación pública sobre la reducción de riesgos de desastre**,** www.ifrc.org

[8] *Brega, V.*(2014) Jugamos, aprendemos y prevenimos, VIII Simposio latinoamericano de Geografía Física y IV Simposio Iberoamericano de Geografía Física, 3-5 de diciembre de 2014, Santiago de Chile, Fac. de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

MODELADO Y CUANTIFICACIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE SEDIMENTOS SUBMARINOS EN LOS MAGMAS ERUPTADOS EN LA ZONA VOLCÁNICA SUR DE LOS ANDES*

Rodrigues D.[ab], Arazi A.[ab], Fracchia D.[c], Martí G. V.[b]

a. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas - CONICET, Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina.*
b. *Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz, 1499, Bs. As., Argentina.*
c. *Comisión Nacional de Energía Atómica, Subgerencia Regional Noroeste, Av. Bolivia 4750, 4400, Salta, Argentina.*

e-mail: darodrig@tandar.cnea.gov.ar

** Este trabajo fue ganador del Primer Premio del Concurso de Jóvenes Investigadores del Encuentro E-ICES 11*

RESUMEN

Una fracción de los sedimentos submarinos acumulados sobre la placa de Nazca es incorporada a los magmas que se generan por fusión parcial del manto durante la subducción de esta placa oceánica por debajo de la placa Sudamericana. A través de este proceso de reciclado, parte del material sedimentario subducido termina participando de las rocas volcánicas eruptadas en la Cordillera de los Andes. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la participación de sedimentos submarinos en la conformación de lavas y tefras extruidas por centros eruptivos de la zona volcánica sur de los Andes. Para ello se utilizó el radionucleido ^{10}Be como trazador, el cual se forma por interacción de rayos cósmicos en la atmósfera y luego precipita sobre los océanos acumulándose finalmente en los sedimentos submarinos. En contraposición, no se encuentra ^{10}Be en el material originario del manto terrestre por ser este mucho más antiguo que su período de semidesintegración (1,4 millones de años). Para esto, se determinó la concentración de este radionucleido por gramo de sedimentos submarinos superficiales en el denominado Punto Triple de Chile (ingreso al sistema de reciclado), en cenizas de tres volcanes de la zona volcánica sur de los Andes (egreso del sistema) y en una muestra de basalto de intraplaca (muestra testigo). Las mediciones se realizaron por la técnica de espectrometría de masas con aceleradores, única capaz de determinar relaciones isotópicas tan bajas como 1 parte en 10^{14} o incluso menores. A partir de los resultados obtenidos y sobre la base de un modelo especialmente desarrollado para su interpretación, se estableció un rango de 9 a 16% para la participación de los sedimentos submarinos subducidos en la conformación de los magmas extruidos. Este resultado es compatible con los observados en arcos volcánicos asociados a otros márgenes convergentes, como por ejemplo en Kurile, Rusia.

Palabras Clave: subducción, ^{10}Be, reciclado cortical, sedimentos submarinos

INTRODUCCION

Durante la subducción de una placa oceánica por debajo de una placa continental, diferentes fenómenos pueden tener lugar en los sedimentos acumulados sobre ellas debido a los esfuerzos de compresión involucrados. Los sedimentos participantes pueden ser acretados contra la placa continental o bien subducidos junto con la placa oceánica. En este último caso, una fracción del material subducido puede ser incorporado a los magmas que se generan por fusión parcial en el manto por debajo del borde continental. El reciclado del material finaliza cuando los magmas se intruyen a lo largo del arco, o bien regresan a la superficie al ser eruptados en forma de rocas volcánicas (ver Figura 1).

Con el advenimiento de la técnica de espectrometría de masas con aceleradores (AMS) fue posible detectar concentraciones del orden de los millones de átomos por gramo de muestra. Así fue que la observación de millones de átomos de ^{10}Be por gramo de roca volcánica, se convirtió en una fuerte evidencia de que los sedimentos submarinos (ricos en ^{10}Be) se reciclan durante la subducción de placas tectónicas [1,

2]. Esto se concluye del hecho de que este radionucleido no puede provenir del manto terrestre, pues el material que lo conforma es lo suficientemente antiguo, en comparación con el período de semidesintegración del ^{10}Be ($T_{1/2}$ ~ 1,4 millones de años), como para que este último haya decaído completamente.

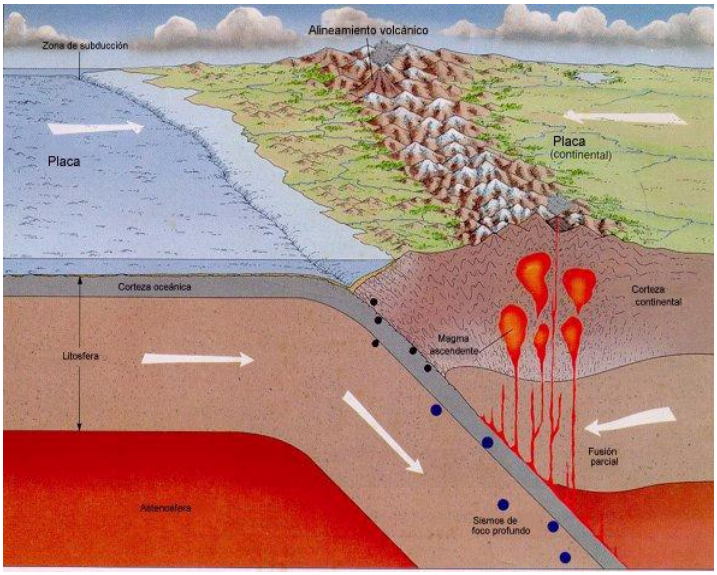


Figura 1. Subducción de una placa oceánica por debajo de una placa continental.
Figura adaptada de *U.S. Geological*.

En este trabajo se determinó la concentración de ^{10}Be en sedimentos submarinos superficiales y en cenizas de tres volcanes de la zona volcánica sur de los Andes por la técnica de AMS. Luego, sobre la base de un modelo geológico desarrollado especialmente, se determinó un rango porcentual para la parcitipación de los sedimentos en la conformación de los magmas eruptados.

Antecedentes

Si bien el concepto de reciclado de material cortical en arcos volcánicos fue propuesto por primera vez por Coats en 1962 [3], no fue hasta la década de 1980 que, gracias a las sensibilidades alcanzadas por la técnica de AMS, se comenzó a utilizar el radionucleido ^{10}Be para estudiar este sistema.

El ^{10}Be es un radionucleido cosmogénico que se produce en la atmósfera de nuestro planeta por el bombardeo de rayos cósmicos de alta energía. Llega a la superficie terrestre principalmente a través de las precipitaciones. En particular, el ^{10}Be se deposita en los sedimentos submarinos, donde puede arribar por precipitaciones sobre el mar o bien, junto con los sedimentos transportados por los ríos. Su relación isotópica (respecto de su isótopo estable ^{9}Be) en sedimentos submarinos fue estudiada por Bourles *et al.* [4] con intenciones de evaluar su potencial para datación.

Tera *et al.* [1] estudiaron rocas de arco volcánico y basaltos utilizados como grupo de control. En los primeros observaron concentraciones de hasta 2×10^7 átomos de ^{10}Be por gramo, mientras que en el grupo de control menos de 10^6. Diferentes escenarios fueron propuestos y modelados para el reciclado de sedimentos. Para hacerlo, utilizaron determinaciones previas de la concentración de ^{10}Be en sedimentos submarinos en el orden de 5×10^9 átomos/g y así estimaron que la participación de sedimentos en la conformación de los magmas eruptados debía encontrarse entre 1% y 10%. Si bien muchos trabajos siguieron esta línea de investigación [2, 5, 6], todos ellos continuaron utilizando los modelos hasta entonces propuestos.

Hickey *et al.* [7] midieron la concentración de ^{10}Be en rocas del volcán Villarrica (39º 25’ S, 71º 56’ O) y pequeños centros de erupción cercanos. Para explicar diferencias significativas observadas entre los mismos sugirieron la posibilidad de que componentes de magmas sean retenidos en cámaras magmáticas por tiempos de entre 350 k.a. y 3 m.a.

Dreyer *et al.* [8] en 2010, midieron por primera vez tanto la concentración de ^{10}Be en magmas como la concentración de ^{10}Be en sedimentos submarinos del margen convergente de Kurile, Rusia. A partir de estas mediciones estimaron que entre 8% y 14% del ^{10}Be subducido junto al sedimento reaparece en el arco volcánico. En su modelo tuvieron en cuenta el flujo de sedimento subducido y el flujo de material extruido y

discutieron los diferentes escenarios propuestos inicialmente por Tera *et al.* [1].

Si bien el ^{10}Be fue ampliamente utilizado como trazador del proceso de subducción, la mayoría de los trabajos no determinaron el inventario de ^{10}Be en los sedimentos subducidos en la zona de estudio sino que lo estimaron utilizando su producción atmosférica y posterior depositación. Otros utilizaron directamente el valor medio de la concentración de ^{10}Be en sedimentos de otras regiones [5].

Actualmente, gracias a las muestras recolectadas por el *Ocean Drilling Program* (ODP) durante los últimos veinticinco años es posible realizar mediciones directas de ^{10}Be en sedimentos submarinos extraídos a más de mil metros de profundidad por debajo del fondo marino. Sin embargo, no se registran en la literatura trabajos que hayan determinado el inventario de ^{10}Be en sedimentos submarinos sobre la placa de Nazca y por lo tanto tampoco, trabajos que hayan relacionado dicho inventario con la concentración de ^{10}Be eruptado en volcanes de la Cordillera de los Andes como se presenta a continuación.

MODELO GEOLÓGICO

A fin de estimar la fracción de los sedimentos subducidos que participa de la formación de los magmas eruptados, fue necesario desarrollar un modelo que tenga en cuenta los mecanismos por los cuales la concentración de ^{10}Be en cenizas y rocas volcánicas (~ 10^7 átomos/g) es significativamente menor que en los sedimentos submarinos superficiales (~ 10^9 átomos/g). Además, debido a la complejidad del escenario que se pretende modelar, fue necesario asumir ciertas hipótesis que permitan reducir las variables presentes a aquellas medibles o disponibles en la literatura.

Del conjunto de mecanismos responsables de modificar la concentración de ^{10}Be, existen al menos cinco que deben ser tenidos en cuenta:

- Pérdida de una fracción superficial de sedimentos acretados.
- Dilución por homogeneización de sedimentos jóvenes y antiguos.
- Decaimiento del ^{10}Be durante el tiempo de reciclado.
- Diferencia entre el flujo de material subducido y extruido.
- Pérdida de átomos que no regresan a la superficie.

Para hacerlo, se escribió una expresión que cuantifique el caudal de átomos de ^{10}Be efectivamente subducidos, esto es:

$$Q_{sub} = \phi_{sub} \cdot {}^{10}Be(a,\tau) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\xi}$$

donde ϕ_{sub} es el flujo total de sedimento subducido, $T_{1/2}$ el período de semidesintegración del ^{10}Be y ξ el tiempo necesario para que el material subducido reaparezca en los volcanes. Este último, calculado como el cociente entre la longitud del canal de subducción y la velocidad de la placa, resulta en (3,5 ± 0.7) m.a. Por su parte, ${}^{10}Be(a,\tau)$ se refiere a la concentración de ^{10}Be en los sedimentos que subducen. La misma depende del porcentaje de material acretado *a* y el tiempo de acumulación de sedimentos sobre la placa τ.
Por otro lado, el caudal de átomos de ^{10}Be extruidos puede expresarse como:

$$Q_{ext} = \phi_{ext} \cdot {}^{10}Be(volcanes)$$

donde ϕ_{ext} es el flujo total de magma extruido y ${}^{10}Be(volcanes)$ la concentración de esta radionucleido en dichos magmas. Luego, la fracción de átomos de ^{10}Be que reaparecen en superficie luego de ser subducidos puede calcularse como el cociente entre estas dos cantidades:

$$f = \frac{Q_{ext}}{Q_{sub}}$$

siendo $1-f$ la fracción de átomos subducidos que no regresan a la superficie. Es importante remarcar que f es una función que, a través de ${}^{10}Be(a,\tau)$, depende de dos variables: el porcentaje de material acretado y

el tiempo de acumulación de sedimentos sobre la placa.

MUESTRAS

Para cuantificar la concentración de ^{10}Be en los sedimentos submarinos, fueron utilizadas dos muestras extraídas por el *Ocean Drilling Program* en el Sitio 860. Dicho lugar de muestreo se ubica en el Punto Triple de Chile (45° 53' S, 75° 45' O, ver Figura 2), y es uno de los tres más cercanos al volcán Hudson de los explorados por este programa. El fondo marino en el lugar de muestreo se encontraba a 2146 metros bajo el nivel del mar.

Para cuantificar la concentración de ^{10}Be en rocas volcánicas se utilizaron cenizas eruptadas por los volcanes Puyehue (40º 35' S, 72° 07' O, erupción de junio de 2011), Chaitén (42º 49' S, 72º 38' O, erupción de mayo del 2008), y Hudson (45º 54' S, 72º 58' O, erupción de agosto de 1991). Además, una muestra de intraplaca que fue considerada como blanco geológico (o muestra testigo de control). Dicha muestra fue recolectada en Río Negro (41 º 37' S, 70º 06'), donde la contaminación con ^{10}Be aportado por los sedimentos se supone despreciable. La ubicación de cada muestra se presenta en el mapa de la Figura 2.



Figura 2. Ubicación geográfica de los volcanes cuyas cenizas fueron estudiadas en este trabajo. Se indica además la ubicación de los sedimentos submarinos y la muestra de intraplaca.

PROCESAMIENTO QUIMICO

Sedimentos submarinos

El procesamiento químico de las muestras de sedimento analizadas comenzó con un ataque químico utilizando una mezcla ácida de HNO_3, HF y HCl para llevar la muestra a solución. Debido a la baja concentración de Be en los sedimentos (del orden de 2 ppm), para poder separar el Be presente fue necesario agregar a las muestras entre 300 y 500 µg de Be con relación isotópica $^{10}Be/^{9}Be = (3{,}3 \pm 0{,}6) \times 10^{-15}$ en calidad de material portador.

En el esquema de la Figura 3 se presenta un diagrama de flujo simplificado del procedimiento

químico llevado a cabo para obtener BeO. La extracción del ^{10}Be presente, así como la supresión química de su isóbaro ^{10}B (el cual interfiere durante las mediciones por AMS) se consiguió utilizando columnas de intercambio con resinas aniónicas y catiónicas específicas para retener estos elementos.

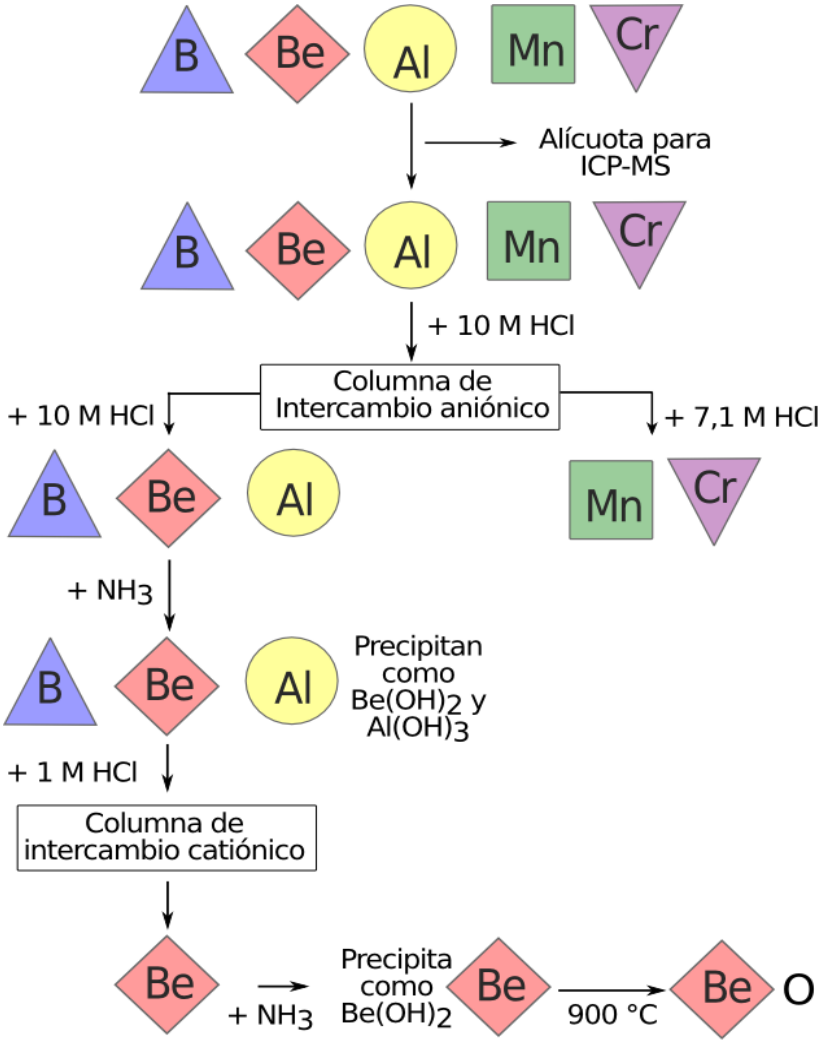


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado del procedimiento químico utilizado para la extracción de Be con la supresión de su isóbaro. Adaptado de Merchel *et al.* [9].

De este modo, los cationes de Be fueron retenidos en las resinas y eluidos luego con el agregado de una solución ácida de concentración adecuada. Mediante una columna de intercambio aniónico fue posible separar los átomos de Mn (con una fracción de los átomos de Cr) de los átomos de Be, Al y otros elementos presentes en la muestra. En una instancia posterior, utilizando una columna de intercambio catiónico, fue posible separar el Be del Al. En este último paso tuvo lugar además la supresión química del B.

El BeO obtenido al final de este procedimiento se mezcló en proporción 1:1 con polvo de aluminio, y tras homogeneizarlo mecánicamente en un mortero, se prensó en los cátodos de Al que serían luego colocados en la fuente de iones del acelerador TANDAR [10].

Cenizas volcánicas

La principal diferencia en el tratamiento de las cenizas volcánicas con respecto a los sedimentos submarinos es consecuencia de la ubicación del ^{10}Be de interés dentro de la muestra. En los sedimentos submarinos, el ^{10}Be que se quiere determinar se encuentra distribuido en volumen (aunque en mayor medida en la fracción autigénica). En las muestras volcánicas, en cambio, el ^{10}Be de interés se encuentra como elemento traza en la estructura cristalina de los silicatos que conforman las tefras[1], ya que el ^{10}Be en la superficie de las tefras

1 Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva.

puede provenir de contaminación meteórica, es decir, provocada por el agua de lluvia. Al tratar entonces con muestras volcánicas se realizó una lixiviación para eliminar el ^{10}Be meteórico que eventualmente puede haber adsorbido.

Para esto se sometió a las muestras a cuatro lavados sucesivos de una hora de duración utilizando un agitador. El primer y último lavados se realizaron utilizando agua ultrapura (18 MΩ cm), el segundo con una solución de HNO_3 al 50% y el tercero con una solución de HF diluido al 10%. En los primeros dos no se observó reducción de la masa de muestra, pero el tercero llevó a solución aproximadamente el 50% de la masa de cada una. Otros procedimientos menos agresivos pueden encontrarse en la bibliografía [11] con excelentes resultados. En ese sentido, reducir hasta un 50 % la muestra con el ataque de HF asegura la eliminación de la fracción externa posiblemente contaminada con ^{10}Be meteórico.

Una vez eliminado el ^{10}Be meteórico adsorbido, se atacó la muestra con una mezcla ácida de HNO_3, HCl y HF. De este modo, todas las muestras fueron llevadas a solución. En este punto, se procedió a agregar la mínima cantidad de material portador necesaria para poder realizar la extracción química del Be. Luego, el procedimiento químico empleado para extraer el Be es esencialmente el mismo que se utilizó en sedimentos, basado en el trabajo de Merchel *et al.* [9] y esquematizado en el diagrama de la Figura 3.

TECNICA DE MEDICION

La técnica de Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) es una herramienta ultrasensible para la determinación de relaciones isotópicas de hasta una parte en 10^{14}. Esta técnica es de utilidad en múltiples disciplinas, utilizando en cada una de ellas un radionucleido cuyo período de semidesintegración resulte adecuado para el problema a estudiar (^{14}C en arqueología, ^{10}Be en geología, ^{53}Mn y ^{60}Fe en astrofísica, ^{129}I y ^{236}U en salvaguardia nuclear, etc.). A diferencia de la espectrometría de masas convencional, AMS permite la completa supresión de las interferencias isobáricas moleculares (por ejemplo ^{9}BeH) y la discriminación de las interferencias isobáricas atómicas (^{10}B en este caso). Esto es posible gracias a la alta energía que el acelerador tipo tándem imprime a las partículas, las cuales pueden ser identificadas mediante sistemas de detección propios de la física nuclear.

Utilizando el Acelerador TANDAR de la Comisión Nacional de Energía Atómica, se lograron avances significativos para disponer de esta herramienta en nuestro país. En recientes experimentos se consiguió una sensibilidad de una parte en 5×10^{13} para el radioisótopo ^{10}Be [10]. Para esto se utilizó una precámara de argón, antes del detector, para frenar completamente al isóbaro ^{10}B, que tiene 5 protones. Por tener un protón menos, el ^{10}Be pierde menos energía al atravesar el argón y puede ser identificado por el detector sin interferencias del ^{10}B.

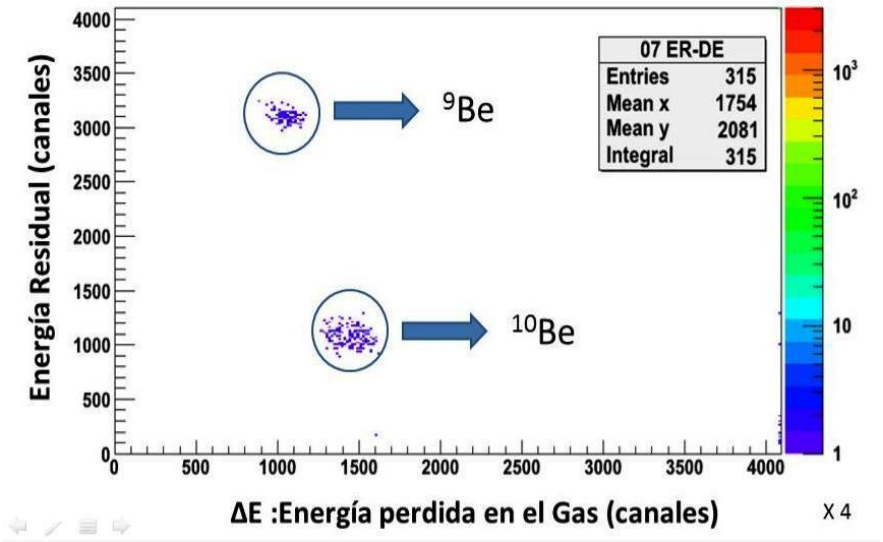


Figura 4. Espectro bidimensional donde se identifican claramente los átomos de ^{10}Be y los de su isótopo estable ^{9}Be.

El detector está compuesto por dos etapas: una cámara de ionización con gas P10 (10% metano, 90% argón) que mide una pérdida parcial de energía (ΔE) en este gas y un detector de silicio que mide la energía residual (E_r). La comparación de ambas señales registradas en coincidencia permite la identificación en masa y

número atómico de las partículas. En la Figura 4 se muestra un espectro bidimensional obtenido con este detector, en el que cada punto representa una partícula detectada.

No se observa la presencia ^{10}B, indicando que dicha interferencia fue completamente suprimida con la precámara de gas argón. De este modo, fue posible contabilizar, literalmente de a uno, átomos del radionucleido de interés lográndose la implementación cuantitativa de la técnica de AMS por primera vez en nuestro país.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Mediciones de ^{10}Be en sedimentos submarinos

El valor de concentración media, obtenido al medir las dos muestras de sedimento submarino superficial, utilizando el acelerador TANDAR, resultó ser C(^{10}Be) = $(1.5 \pm 0.4) \times 10^9$ átomos/gr. El mismo es consistente con el valor previamente reportado en la fracción autigénica de dichas muestras [12] si se tienen en cuenta la concentración de ^{10}Be y ^{9}Be en cada fracción [4].

Esta concentración, permite determinar el inventario de ^{10}Be en los sedimentos submarinos hemipelágicos que la placa de Nazca acumuló mientras se acercaba a la placa sudamericana debajo de la cual subduce. En otras palabras, es la información necesaria para cuantificar el ingreso de este radionucleido al proceso de reciclado que se quiere estudiar.

Mediciones de ^{10}Be en cenizas volcánicas

Las mediciones realizadas para determinar la relación isotópica ^{10}Be/^{9}Be en cenizas volcánicas se llevaron a cabo con el acelerador SARA. Se trata de un acelerador de 1 MV de tensión de terminal emplazado en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla, España. La técnica utilizada en esta instalación para medir ^{10}Be es la de frenado parcial y deflexión electrostática [13]. En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos en función de la latitud de los volcanes.

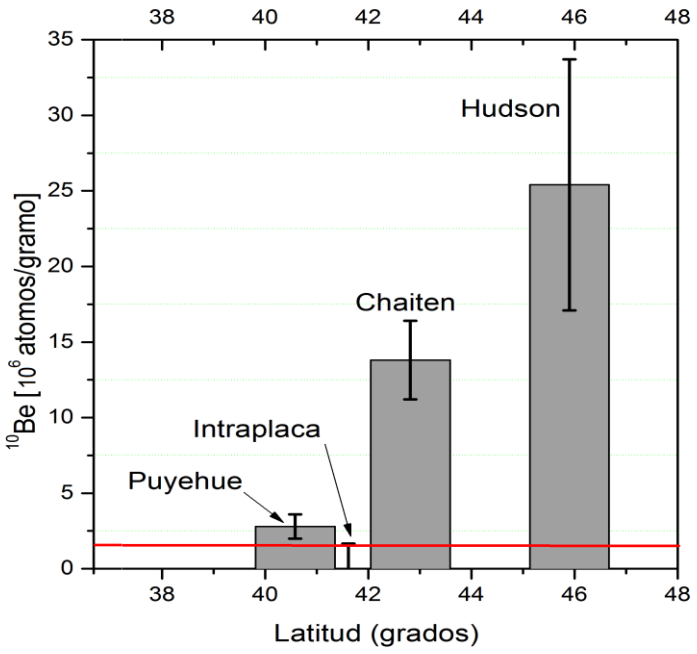


Figura 5. Concentración de ^{10}Be por gramo de ceniza volcánica estudiada. Se incluye además el límite de detección debajo del cual se encuentra el valor obtenido para la muestra de intraplaca.

Como puede observarse, el basalto de intraplaca utilizado como blanco geológico (muestra de control) es efectivamente la que presenta menor relación isotópica ^{10}Be/ ^{9}Be encontrándose, de hecho, por debajo del límite de detección. Utilizando la concentración de Be por gramo de muestra tratada, obtenida mediante

mediciones por la técnica de ICP-MS, es posible traducir estos resultados en concentraciones de átomos de ^{10}Be por gramo de muestra.

DISCUSION

A continuación, haciendo uso del modelo geológico oportunamente presentado, se utilizarán los resultados obtenidos para extraer información de interés sobre el reciclado de sedimentos submarinos.

Las concentraciones de ^{10}Be por gramo de ceniza volcánica, en el orden de 10^7 átomos por gramo, son compatibles con los valores reportados por Tera *et al.* [1]. A su vez, que la relación isotópica en la muestra de intraplaca se encuentre por debajo del límite de detección de la técnica de AMS es consistente con que en la zona del manto en que se formó el magma que generó este basalto se halla lejos del área de influencia de los sedimentos subducidos. Esto confirma entonces, que la presencia de ^{10}Be en las muestras de cenizas volcánicas da cuenta de la contaminación de los magmas con material introducido en el arco durante la subducción de sedimentos submarinos ricos en ^{10}Be.

En la Figura 6 se presenta el resultado de imponer al modelo geológico la concentración de ^{10}Be medida en las cenizas de los volcanes Hudson, Puyehue y Chatien y en los sedimentos submarinos superficiales.

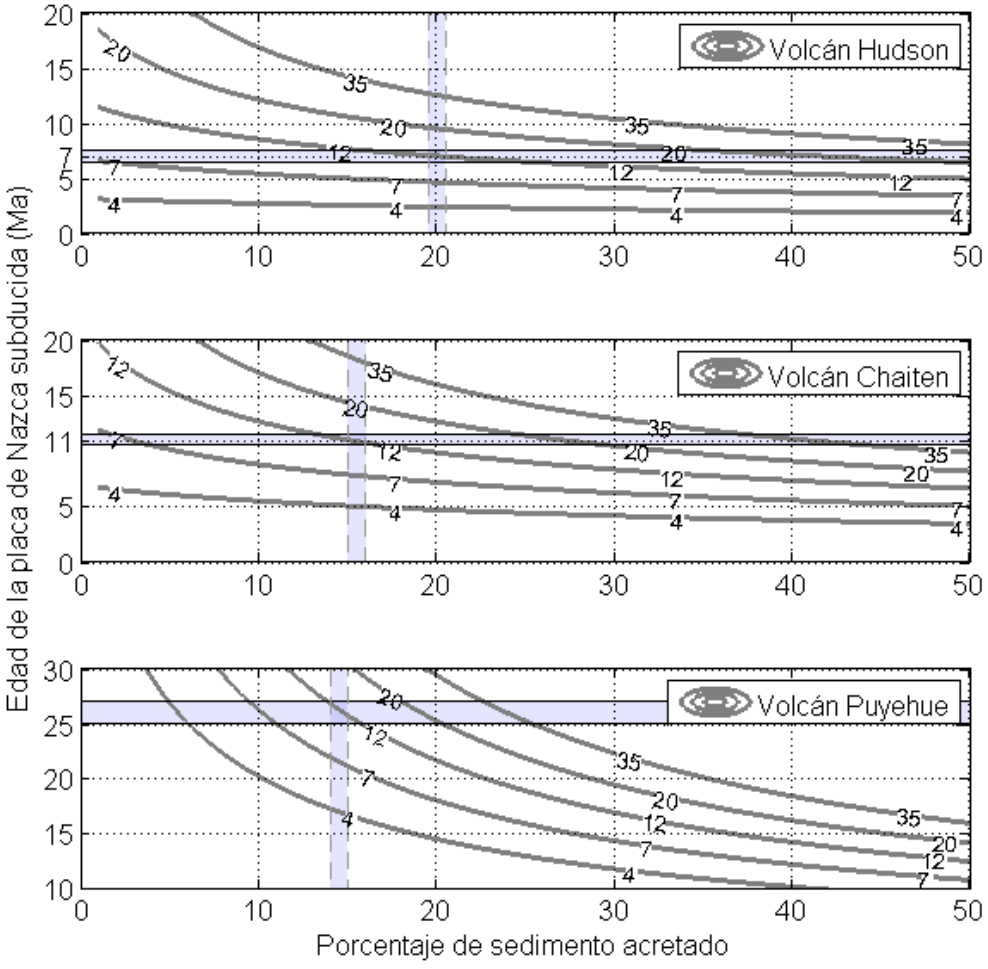


Figura 6. Modelo sujeto a las concentraciones de ^{10}Be medidas en las cenizas de los volcanes Hudson, Puyehue y Chatien.

Cada curva de nivel corresponde a un porcentaje de participación $\boldsymbol{f}$ diferente. El porcentaje de sedimento acretado (franja vertical) y la edad de la placa subducida (franja horizontal) a la latitud del volcán Hudson hace 3,5 m.a., fueron extraídos del trabajo de Behrmann et al. [14], siendo: $\boldsymbol{a}$ = (20 ± 1) % y $\boldsymbol{\tau}$ = (7,0 ± 0,5) m.a. Luego, a partir de la intersección de las curvas de nivel resultantes del modelo y estos parámetros, un

porcentaje de participación f de aproximadamente 12% es sugerido para explicar los valores medidos a esta latitud. Sin embargo, para incluir todo el rango en el que incursiona f al variar a y τ dentro de una desviación estándar, resulta que: 9 % < f < 16%.

En las latitudes de los volcanes Puyehue y Chaiten, aún no se han reportado porcentajes de material acretado. Sin embargo, considerando en primera aproximación un mismo porcentaje de participación en toda la zona volcánica sur, pueden estimarse los porcentajes de material acretado y la edad de la placa subducida necesarios para explicar el ^{10}Be observado en las cenizas de estos volcanes. El resultado de realizar esta consideración se presenta en los correspondientes gráficos de la Figura 6.

CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó, por primera vez, la concentración del radionucleido cosmogénico ^{10}Be - formado por interacción de rayos cósmicos en la atmósfera de nuestro planeta- en sedimentos submarinos acretados en el prisma de acreción presente sobre el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana. Para ello se utilizó la técnica de espectrometría de masas con aceleradores, la única capaz de determinar relaciones tan bajas de un radionucleido respecto de su isótopo estable como una parte en 10^{14}. Esto significó, la implementación de esta técnica en forma cuantitativa en nuestro país.

Se determinó además la concentración de ^{10}Be en cenizas de los volcanes Hudson, Puyehue y Chaiten y una muestra de basalto de intraplaca. Por un lado, se verificó que la muestra de intraplaca no contenía cantidades medibles de ^{10}Be por encontrarse suficientemente alejada de la zona de subducción. Por otro, se observaron concentraciones de ^{10}Be en cenizas volcánicas sólo compatibles con que los átomos de origen cormogénico depositados inicialmente en los sedimentos submarinos hayan transitado todo el ciclo de reciclado de 3,5 m.a. hasta reaparecer en los magmas eruptados por los volcanes.

Se desarrolló y evaluó un modelo geológico para el reciclado de sedimentos durante la subducción. Como resultado, se estableció un rango de participación de sedimentos en la conformación de magmas eruptados en la zona volcánica sur de los Andes de 9 a 16%. Este resultado se encuentra en completo acuerdo con el reportado en otro margen convergente, el de Kurile en Rusia, donde el rngo fue estimado en 8 a 14%.

AGRADECIMIENTOS

Por tratarse de un trabajo multidiciplinario son muchas las personas y de diferente disciplinas, las que de una forma u otra colaboraron para que este proyecto fuera posible. Los autores desean agradecer a todos ellos por su buena predisposición durante los años de investigación.

REFERENCIAS

[1] Tera, F., Brown, L., Morris, J., Sacks, I. S., Klein, J., y Middleton, R. (1986). Sediment incorporation in island-arc magmas: Inferences from 10 Be. Geochimica et Cosmochimica Acta, 50:535–550.

[2] Morris, J. y Tera, F. (1989). ^{10}Be and ^{9}Be in mineral separates and whole rocks from volcanic arcs: Implications for sediment subduction. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53:3197–3206.

[3] Coats, R. R. (1962). Magma type and crustal structure in the Aleutian arc. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 6:92–109.

[4] Bourles, D., Raisbeck, G. M., y Yiou, F. (1989). ^{10}Be and ^{9}Be in marine sediments and their potential for dating. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53:443–452.

[5] Morris, J. D., Leeman, W. P., y Tera, F. (1990). The subducted component in island arc lavas: constraints from Be isotopes and B-Be systematics. Nature, 344:31–36.

[6] Sigmarsson, O., Condomines, M., Morris, J. D., y Harmon, E. S. (1990). Uranium and ^{10}Be enrichments by fluids in Andean arc magmas. Nature, 346:163–165.

[7] Hickey-Vargas, R., Sun, M., L ópez-Escobar, L., Moreno-Roa, H., Reagan, M. K., Morris, J. D., y Ryan, J. G. (2002). Multiple subduction components in the mantle wedge: Evidence from eruptive centers in the Central Southern volcanic zone, Chile. Geology, 30:199.

[8] Dreyer, B., Morris, J., y Gill, J. (2010). Incorporation of subducted slab-derived sediment and fluid in arc magmas: B–be–10be–εnd systematics of the kurile convergent margin, russia. Journal of Petrology, 51(8):1761–1782.

[9] Merchel, S. y Herpers, U. (1999). An Update on Radiochemical Separation Techniques for the Determination of Long-Lived Radionuclides via Accelerator Mass Spectrometry. Radiochimica Acta.

[10] Rodrigues, D., Arazi, A., Abriola, D., de Barbará, E., Capurro, O., Cardona, M. A., Gallardo, J., Gollan, F., Hojman, D., Marti, G., Negri, A., Fernandez Niello, J., Pacheco, A., Samsolo, N., Togneri, M., y Villanueva, D. (2015). Espectrometría de Masas con el Acelerador TANDAR: Mediciones de $^{10}Be/^{9}Be$. Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.

[11] Braucher, R., Benedetti, L., Bourles, D., Brown, E., y Chardon, D. (2004). Use of in situ-produced ^{10}Be in carbonate-rich environments: A first attempt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69:1473–1478.

[12] Rodrigues, D., Arazi, A., Marti, G. V., y Korschinek, G. (2014). Aplicación de la técnica de Espectrometr ía de Masas con Aceleradores en el estudio de la din´amica de sedimentos submarinos. Anales de la Asociación de Física Argentina, 25:51–55.

[13] Chamizo, E., López-Gutiérrez, J. M., Ruiz-Gómez, A., Santos, F. J., García-León, M., Maden, C., y Alfimov, V. (2008). Status of the compact 1 MV AMS facility at the Centro Nacional de Aceleradores (Spain). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 266:2217–2220.

[14] Behrmann, J. and Kopf, A. (2001). Balance of tectonically accreted and subducted sediment at the Chile Triple Junction. International Journal of Earth Sciences.

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO DE LOS SEDIMENTOS EXTRUIDOS EN ESTRUCTURAS DE SELECCIÓN PRESENTES EN LA ALTA MONTAÑA DEL NW ARGENTINO

Saccone Paolo F.[a, c], Ahumada Ana L.[a, b]

[a]Instituto de Geología del Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Tucumán ARGENTINA

[b]CONICET [c]Facultad de Cs. Naturales- UNT,

e-mail: estriasglaciares@gmail.com

Palabras Clave: **Sedimentos Extruidos, Estructuras de Selección, Suelos Estructurados**

Resumen:

El permafrost de montaña, se manifiesta en las altas montañas del Noroeste Argentino por la presencia de glaciares de escombros y una asociación de geoformas menores generadas por el congelamiento permanente o estacional de los suelos. Este trabajo está enfocado en el estudio litológico y granulométrico de los suelos estructurados de un sector de la sierra de Santa Victoria; en ellos se realizaron muestreos de sedimentos finos extruidos, con el objeto de lograr nuevos avances en el conocimiento de la dinámica ambiental actual como así también adquirir nuevos recursos para la interpretación paleoambiental y sus respectivas implicancias. Los análisis sedimentológicos muestran una clara tendencia de la fracción fina (arena muy fina/limo), litológicamente el material recolectado se corresponde con la geología del sector y es concordante con la actividad de los procesos extrusivos que los exhibieron en superficie.

Palabras claves: Sedimentos Extruidos, Estructuras de Selección, Suelos Estructurados.

Introducción:

Las características geomorfológicas y climáticas de los cordones montañosos del NW argentino permiten definir ambientes periglaciales con presencia de permafrost por encima de los 4200 msnm. El conocimiento de su existencia en diferentes sectores, tales como la Cordillera Oriental tiene sus primeros estudios ya en el año 1982 por parte del Dr. A. Corte. Ahumada 1986, en su Tesis Doctoral describe entre otros, los mecanismos responsables del modelado periglacial. Trabajos más recientes como los de Trombotto y Ahumada, 2005; Ahumada et al, 2011, 2012, 2014 y 2015; describen geoformas de origen criogénico, evidencia directa de la dinámica de dicho ambiente. Existen numerosos geoindicadores que confirman el dominio del entorno criogénico y en muchos casos, la presencia de suelo permanentemente congelado ligado al mismo. Algunos de estos indicadores tales como la solifluxión de laderas (gelifluxión) en sus diferentes manifestaciones (bloques, lóbulos, etc...), asociaciones de prótalus, glaciares de escombros y rocas fracturadas producto de la crioclastía se exhiben cubriendo parte de la topografía o formando parte de esta. La actividad geocriogénica da como resultado geoformas de diferentes escalas, entre las menores presentes en el área de estudio, se han identificado suelos estructurados, los que a la vez constituyen, en algunos

casos redes seleccionadas. Estas formas serían originadas por selección primaria por congelamiento y levantamiento diferencial por congelamiento (Washburn, 1979). Corte (1962) estudió experimentalmente el movimiento diferencial de partículas de diferentes tamaños concluyendo que cuando los ciclos de congelamiento y descongelamiento actúan en un plano horizontal, las partículas gruesas migran hacia a arriba y los finos hacia abajo. Una vez lograda esta selección, verticalmente, en la zona de material fino, con presencia de limos, se formarían lentes de hielo que provocarían la extrusión. Dichas estructuras presentan variantes en cuanto a su desarrollo y preservación ya que la posición topográfica y su asociación con criogeoformas de orden mayor, como es el caso de los glaciares de escombros; algunas veces condicionan su presencia.

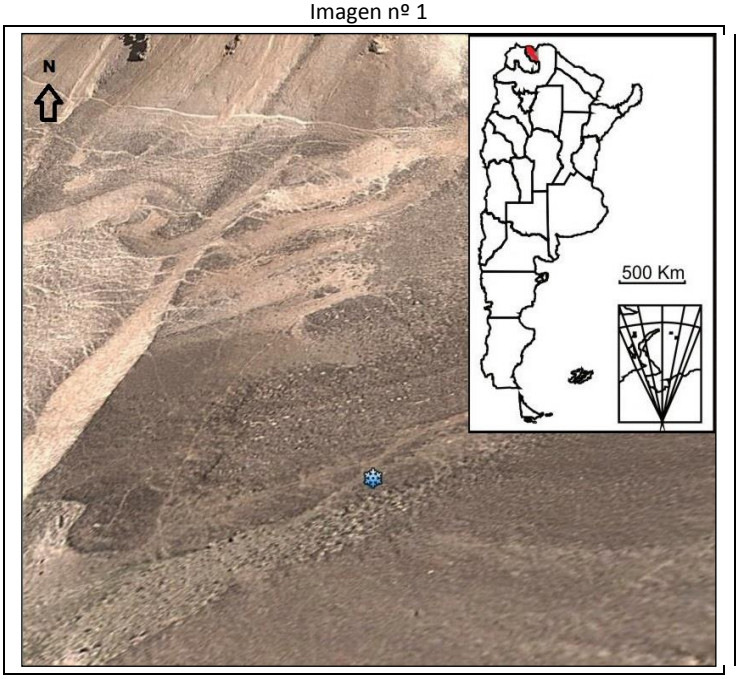
Objetivos:

El objetivo de este trabajo es identificar la composición litológica y la fracción granulométrica que domina en los suelos estructurados del sector de estudio. El origen y desarrollo de las estructuras de selección están vinculados a procesos de congelamiento y descongelamiento que afectan a los detritos. La presencia de hielo y la convección de materiales que se produce durante estos ciclos, da como resultado el ordenamiento de los mismos. A partir de esta premisa es que el estudio puede encararse desde diferentes ópticas, aquí se optó por analizar los materiales finos que constituyen parte del proceso antes citado, con lo cual se espera generar una nueva herramienta que permita ampliar más el conocimiento e interpretación en profundidad de estos procesos en la zona de estudio y las diferentes connotaciones ambientales actuales y pasadas preservadas en estos materiales.

Características Generales del Área de Estudio:

La provincia Geológica de Cordillera Oriental está constituida por diferentes serranías, la Sierra de Santa Victoria, donde se realizó este estudio, es la cadena montañosa más septentrional de este sistema morfoestructural que se extiende hasta el país vecino de Bolivia. Dicha sierra configura el límite interprovincial entre Jujuy y Salta, ver imagen 1. Tiene una disposición meridional en su tramo septentrional variando este rumbo a nor- nordeste /sur – sudoeste en su tramo austral. La Sierra de Santa Victoria presenta cotas superiores a los 5000 m s.n.m., como por ejemplo el Cerro Fundición con 5050 m s.n. m. Con el mismo estilo estructural que caracteriza a la provincia geológica a la cual pertenece, presenta un basamento fallado y plegado, desplazado hacia el este sobre las Sierras Subandinas. Las rocas cristalinas de edad Precámbrica /Eocámbrica pertenecen a la Formación Puncoviscana (S.L.). Suprayacentes están las areniscas Cámbricas del Grupo Mesón; le suceden las lutitas y areniscas Ordovícicas del Grupo Santa Victoria las que son cubiertas por acumulaciones clásticas del Pleistoceno Superior y Holoceno.

Imagen nº 1



Respecto al clima, considerando a Ahumada *et al*, 2015, los datos más cercanos provienen de la Estación Meteorológica de la Quiaca dependiente del Servicio Meteorológico Nacional, ubicada a 3459 msnm. Los valores de las precipitaciones son de 322 mm/año y la temperatura media anual del aire es de 9.4°C (promedio período 1908 – 1990, Bianchi y Yañez, 1992). Esta localidad, registra poca variación climática estacional pero con una amplitud térmica diaria muy marcada. Los días son cálidos con temperaturas máxima media anual de 19 a 20°C y las noches son frías con temperaturas mínima media anual de 0 a -2°C (Minetti, 2005). Teniendo en cuenta el gradiente altitudinal de 0.8°C/ 100 m (ajustado por Kull et al., 2003) y en base a los datos de la Estación Meteorológica arriba citada, calculamos por extrapolación, la temperatura media anual del aire para una altura promedio de 4400 msnm, que resultó de unos 1,9°C aproximadamente y para los 4600 msnm de 0,3°C aproximadamente. Estas condiciones meteorológicas generan fenómenos de congelamiento y descongelamiento diario y estacional; favoreciendo a la vez la conformación de paisajes periglaciales.

Metodología:

El estudio de las texturas sedimentarias es una herramienta de valor para el análisis ambiental ya que está estrechamente relacionado a las fuerzas físicas que son activas durante el transporte y la depositación. Para la realización de este trabajo se concretaron dos campañas, durante las cuales se identificaron las geoformas de interés, se registraron parámetros morfométricos y de manera simultánea se colectó el sedimento de interés, usando para esto un muestreo representativo, ver imágenes 2,3 y 4.

Imagen nº 2



Imagen nº 3



Imagen nº 4



En laboratorio se realizaron las tareas de secado y cuarteo, a partir de allí, el sedimento se analizó por su granulometría o distribución textural. La densidad de distribución textural o simplemente textura, es el porcentaje o frecuencia con que se presenta cada tamaño de grano en un sedimento. La frecuencia de cada grado o clase textural se obtiene extrayendo el material cuidadosamente pesando cada fracción, luego se calcula el peso en porciento que representa cada fracción y por último se suman porcentajes para obtener el peso en porciento acumulado, el cual se emplea para graficar las curvas acumulativas y los respectivos histogramas que derivan de estas. El tamizado es un procedimiento analítico aplicado a materiales cuyo rango de tamaños varía entre 16 mm y 0,0625 (o sea entre - 4 Ø y + 4 Ø). Este rango textural es dividido en intervalos de tamaños, que son elegidos según los tamices disponibles para este propósito. Los valores obtenidos por sí solos son poco representativos, por ello a partir de estos se graficaron primeramente las curvas acumulativas y luego los histogramas derivados de estas.

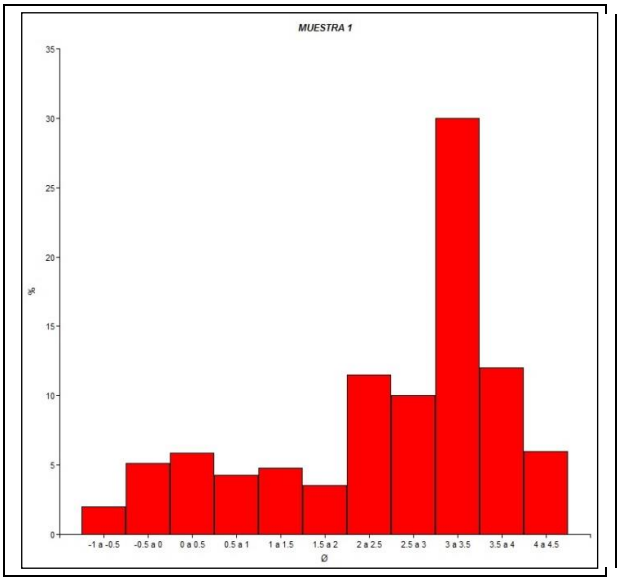
Para la observación e identificación litológica de las muestras bajo lupa binocular, se empleó la fracción granulométrica comprendida entre los valores de malla 60 y 35 según normas USA Standar ASTM. Para evitar errores por pérdidas o disolución dada la naturaleza de los sedimentos y el objeto de este trabajo, la observación previa se realizó con el material extraído directamente del tamizado, lavado únicamente con agua destilada y a posteriori con solución de HCl al 10% durante 10 minutos y enjuagado con agua destilada, previendo la menor agresividad posible.

Resultados:

Con el resultado de las fracciones adquiridas a partir del tamizado, se estimó una mayor abundancia de material correspondiente al tamaño limo grueso. Posteriormente se elaboraron en borrador las curvas acumulativas de distribución de cada una de las muestras estudiadas, a partir de las cuales se derivaron los diagramas de barras correspondientes. Estos gráficos permiten una sencilla y rápida visualización de los resultados. Estos resultados muestran en todos los casos dos poblaciones sobresalientes con una moda primaria y una o más secundarias.

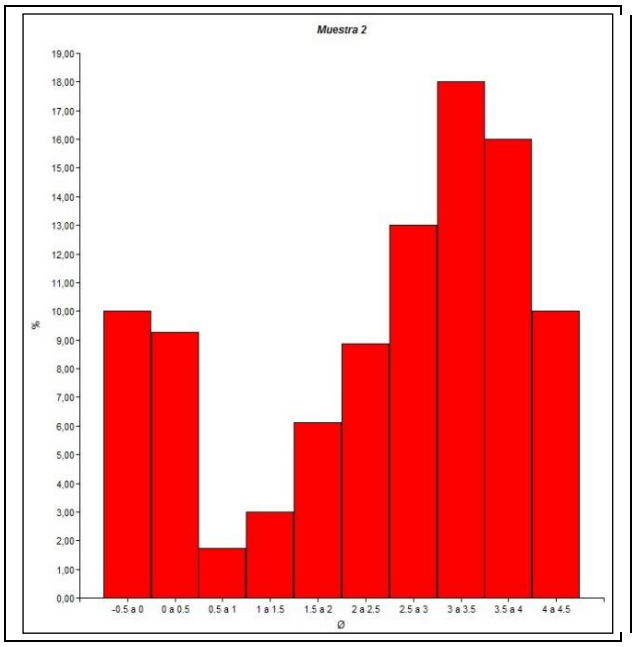
Muestra #1: presenta dos poblaciones, la primera comprendida entre los intervalos de 2 Ø (arena fina) a 4, 5 Ø (limo grueso), exhibe la moda más representativa en 3/3,5 Ø (arena muy fina). Una segunda población se destaca entre -0,5 Ø (arena muy gruesa) y 1, 5 Ø (arena media), con una moda menos acentuada en 0/ 0.5 Ø correspondiente a la fracción arena muy fina. Ver figura 1

Figura 1



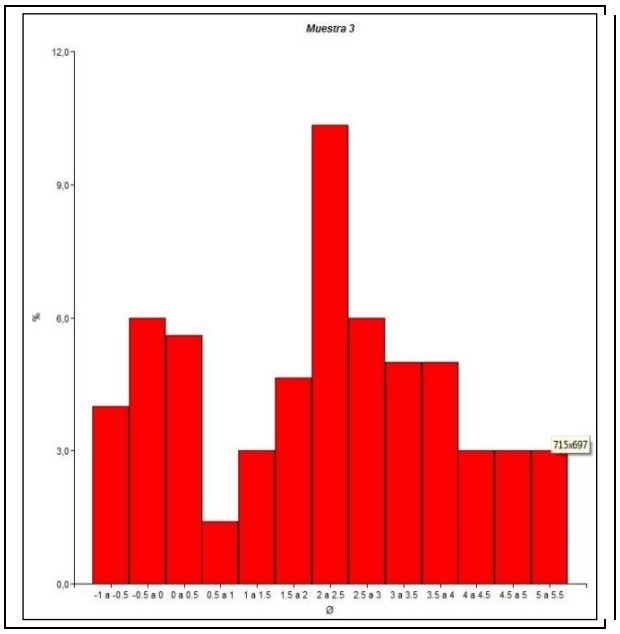
Muestra #2: presenta dos poblaciones, la primera comprendida entre los intervalos de 2, 5 Ø (arena fina) a 4, 5Ø (limo grueso), exhibe la moda más representativa en 3/3,5Ø (es decir arena muy fina). Una segunda población se destaca entre -0,5Ø (arena muy gruesa) y0, 5Ø (arena gruesa), con una moda menos acentuada en -0.5 / 0 Ø correspondiente a la fracción arena muy gruesa. Ver figura 2

Figura 2



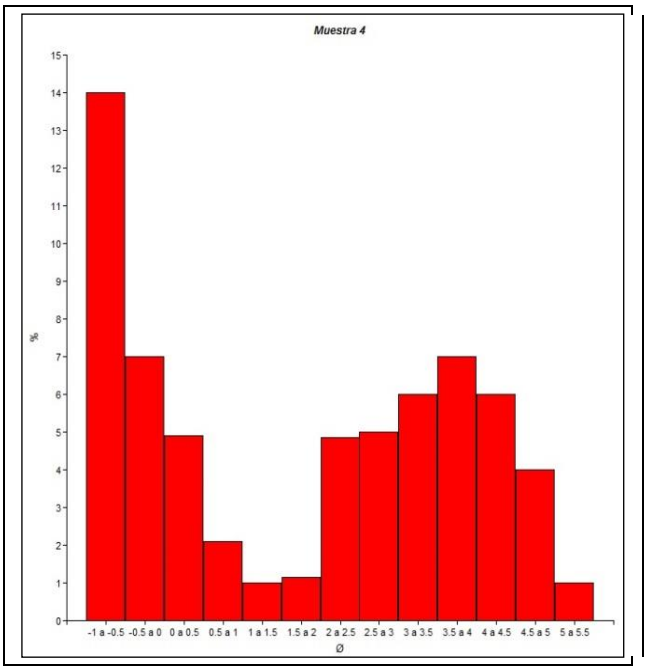
Muestra #3: presenta dos poblaciones la primera comprendida entre los intervalos de 1, 5Ø (arena media) a 4Ø (arena muy fina / limo grueso), exhibe la moda más representativa 2/2,5Ø (es decir arena media / fina).Una segunda población se destaca entre -1Ø (arena muy gruesa /sábulo)y0, 5Ø (arena gruesa), con una moda menos acentuada en –0.5/0 Ø correspondiente a la fracción arena muy gruesa. Ver figura 3

Figura 3



Muestra #4: presenta dos poblaciones pero con distribución textural diferente del resto. La primera comprendida entre los intervalos de -1 Ø (límite sábulo- arena muy gruesa) a 0,5Ø (arena gruesa), exhibe la moda más representativa con moda en -1Ø/-0,5Ø (es decir arena muy gruesa). Una segunda población se destaca entre 2Ø (arena media) y 5,5 Ø (limo fino), con una moda menos acentuada en 3.5 / 4 Ø correspondiente a la fracción arena muy fina. Ver figura 4

Figura 4



Con respecto al análisis litológico los valores promedio para un total de 8 campos observados por cada muestra, arrojaron los siguientes porcentajes: fragmentos de lutitas 46 %, fragmentos de areniscas silicificadas 30%, cuarzo 24%.

Conclusiones:

Existen aún complejidades respecto de la génesis de los procesos criogénicos que dan origen a ciertas geoformas periglaciares, en el sector de estudio. Particularmente las estructuras de selección criogénica, tales como los suelos estructurados, los círculos de piedra en sus diferentes dimensiones y grado de desarrollo, sin lugar a dudas son producto del reordenamiento de los materiales por acción del congelamiento del suelo y la respectiva presencia de hielo en el mismo. Estas estructuras se presentan en suelos que experimentan congelamiento y descongelamiento estacional durante numerosos ciclos. En nuestro sector de estudio, las estructuras analizadas se desarrollan en sectores próximos a glaciares de escombros, sin evidencia de procesos vinculados con la presencia de permafrost, sustentando la idea de que son el resultado del congelamiento estacional. Los análisis granulométricos aquí realizados muestran una marcada dominancia de los materiales finos (fracción arena muy fina a limo grueso) para tres de las muestras, #1, #2 y #3; excepto para la muestra #4, no obstante la similitud entre las muestras respaldan la idea respecto de la actividad de los procesos,

principalmente por la extrusión de material fino durante las etapas más avanzadas de la selección criogénica. Los procesos de estructuración y selección criogénica en el sector de estudio exhiben rasgos de actividad, como es el caso de los poros dejados por la formación de hielo, principalmente en los centros de las geoformas (imagen 2 y 4), donde se realizaron los muestreos. Por otro lado el empleo de técnicas de estudio específicas sobre estos materiales analizados, podrían aportar mayores datos respecto de las características paleoambientales de la región y de la dinámica periglacial generadora de este paisaje; siendo este trabajo el puntapié inicial en el avance sobre estudios de las fracciones más finas.

En la litología observada, se determinó que el material constituyente de las fracciones finas extruidas (malla 60 y 35 según normas USA Standar ASTM) son lutitas correspondientes a la Fm. Santa Rosita- Grupo Santa Victoria y las areniscas silicificadas a la Fm. Lizoite – Grupo Mesón, existiendo una correspondencia con la geología del sector y las probables áreas de aporte. El cuarzo se presenta de diversas formas, por lo general son anhedrales, muchos de ellos presentan inclusiones, los individuos límpidos y/o ehuedrales son menos abundantes; siendo probable como fuente origen, la meteorización de las rocas de la Fm. Lizoite, al menos para el tamaño de grano analizado. Esta concordancia también se reconoce en los fragmentos macroscópicos. La composición de las fracciones más finas deberán ser identificadas por otros métodos ya que existiría la posibilidad de una proveniencia alóctona dada las características reinantes durante los períodos de aridez que modelaron parte del ambiente periglacial en el Cuaternario.

Referencias:

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P. y Páez, S. V. 2011. *Glaciares de escombros en la Sierra de Santa Victoria*. En: Actas del XVIII Congreso Geológico Argentino (Eds. Leanza, Franchini, Impiccini, Pettinari, Sigismondi, Pons y Tunik), p. 1264-1265. Neuquén, Argentina. ISBN 978-987-22403-4-9.

Ahumada, A.L., Ibañez Palacios, G.P., Toledo, M.A. y Páez, S.V. 2012. *El permafrost de montaña en las cabeceras del río Bermejo.* Actas de Resúmenes de la XXVI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas y Primer Taller Internacional de Geomática en las Ciencias de la Tierra. Versión digital.

Ahumada, A.L., Ibáñez Palacios, G. P., Toledo M.A., Carilla J. y Páez, S.V., 2014. *"El permafrost reptante, inventario y verificación en las cabeceras del río Bermejo".* GEOACTA 39(1): 123-137. ISSN 1852-7744.

Ahumada, A.L., Ibañez Palacios, G. P., Toledo M.A., Carilla J. y Páez, S.V. 2015. *"Observaciones geomorfológicas en glaciares de escombros de los Andes tropicales de Argentina".* Acta Geológica Lilloana 27(2): 63-76

Bianchi, A.R. y Yañez, C.E. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. Segunda edición. INTA, Salta, Argentina.

Boggs, 1992. Principles of Sedimentology and Stratigraphy 4th ed. 655 pp. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Corte, A. E.; D. T. A. Trombotto & A. L. Ahumada 1982. Relevamiento de la geomorfología criogénica del NW Argentino. IANIGLA, CRICYT-CONICET-MENDOZA. Informe Interno. 50 pp.

Kull, C. *et al*, 2003. Evidence of an LGM cooling in NW Argentina (22° S) derived from a glacier climate model. Quaternary International, 108: 3-11.

Minetti, J.L. 2005. El clima del Noroeste Argentino. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C. zon Caldenius, Tucumán, 350 pp.

Trombotto, D. T. y Ahumada, A. L. 2005. Los fenómenos periglaciales. Identificación, determinación y aplicación. Opera Lilloana 45, 131pp.

OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DE PREDICCIÓN PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

María Laura Tardivo[a,b,c], Miguel Méndez Garabetti[a,b], Paola Caymes Scutari[a,b], Germán Bianchini[a]

[a] Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido (LICPaD)
Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información, Facultad Regional Mendoza,
Universidad Tecnológica Nacional. (M5502AJE) Mendoza, Argentina
[b] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
[c] Departamento de Computación, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto,
(X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba, Argentina

e-mail: lauratardivo@dc.exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

Año a año los incendios forestales devastan miles de hectáreas en diferentes regiones del planeta, arrasando no sólo con la flora y la fauna, sino también poniendo en riesgo a la población y los recursos regionales de los sectores turísticos y productivos. El estudio de modelos y métodos matemático-computacionales que ayuden a predecir su comportamiento puede ser de gran utilidad tanto para poder combatirlos, como para realizar planes de evacuación en aquellas zonas potencialmente afectadas por el fuego. Sin embargo, los modelos suelen presentar limitaciones por la cantidad de parámetros que son necesarios para representar las características del entorno ambiental en las cuales se desarrolla el incendio, y sobre todo por la imposibilidad de cuantificarlos en tiempo real. En consecuencia, los parámetros son representados por valores estimativos, obtenidos por muestreo o por mediciones indirectas, lo que disminuye la precisión de las predicciones y genera una incertidumbre sobre dichos valores. Por este motivo, se hace necesario el uso de estrategias de reducción de incertidumbre sobre los valores de los parámetros de entrada de los modelos. El Sistema Estadístico Evolutivo (ESS) es un método de simulación y predicción computacional que utiliza la estadística para determinar la tendencia del fenómeno, en conjunto con Algoritmos Evolutivos de única población y evaluación en paralelo para orientar la búsqueda hacia una predicción más precisa. Ha sido utilizado como método de reducción de incertidumbre para predecir la línea de fuego de incendios forestales y ha demostrado muy buenos resultados en cuanto a la calidad de la predicción. En este trabajo se propone la utilización de Evolución Diferencial como metaheurística alternativa para orientar la búsqueda, la cual provee al modelo ESS múltiples poblaciones y esquema de migración grupal bajo un Modelo de Islas. En su operador de mutación y cruzamiento esta metaheurística utiliza diferencia de vectores para guiar la búsqueda hacia mejores soluciones. Los resultados obtenidos demuestran que la nueva propuesta logra una predicción más efectiva que ESS.

Palabras Clave: Evolución Diferencial, Predicción, Computación Paralela, Incendios forestales, Modelo de Islas

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un componente natural de muchos ecosistemas y son, por lo tanto, un elemento necesario para el mantenimiento del equilibrio de estos complejos sistemas. Sin embargo, bajo ciertas condiciones ambientales, como altas temperaturas y sequía, pueden convertirse en una gran amenaza para la población y para el medio ambiente. En Marzo de 2015 un devastador incendio forestal se desató en Chubut, en la zona de Cholila, propiciado por intensos vientos que contribuyeron a que las llamas avancen rápidamente sobre las plantaciones de pino, y devastando alrededor de 34 mil hectáreas (Figura 1).

Ya sea de origen natural o antropogénicos, los efectos de los grandes incendios forestales pueden ser catastróficos y devastadores. Los gobiernos deben invertir mucho dinero en recursos humanos y materiales, tanto para lograr combatirlos como para reconstruir aquellas zonas afectadas por la quema. Los incendios alteran la disponibilidad de los recursos naturales, con la consecuente repercusión sobre la vida cotidiana de las comunidades afectadas.

En el proceso de lucha contra el fuego se complementa e informa las acciones de las fuerzas de seguridad con herramientas, sistemas y/o estrategias como simuladores de incendios, cortafuegos, estrategias de evacuación, tecnología para la extinción del fuego, etc., que se utilizan en diferentes etapas del proceso: prevención, predicción, detección y monitorización de incendios. La etapa de predicción de los incendios forestales es una tarea esencial para permitir un buen manejo del fuego y para mitigar el riesgo sobre las posibles zonas afectadas. La predicción consiste en intentar pronosticar el comportamiento de la propagación de un incendio forestal ya iniciado, de manera tal de conocer con antelación las zonas que presentarán mayor riesgo de ser alcanzadas por el fuego, lo que posibilita la toma de decisiones respecto de las acciones a llevar a cabo para contrarrestarlo.

La propagación de un incendio forestal está determinada por varios factores, ya sean estáticos (pendiente del terreno, tipo de vegetación, cantidad de combustible) o dinámicos (velocidad y dirección del viento, humedad de la vegetación) [1]. El principal objetivo de los investigadores de incendios forestales es proveer modelos que expliquen y predigan el comportamiento o la propagación del fuego sobre el terreno. Estos modelos pueden ser utilizados para desarrollar simuladores y herramientas de toma de decisiones [2,3,4,5]. Sin embargo, modelar el comportamiento del fuego no es una tarea sencilla. Los modelos deben ser alimentados por parámetros de entrada que se utilizan para representar los diferentes factores dinámicos que determinan el comportamiento del incendio. Al momento de llevar a cabo una predicción resulta muy poco probable conocer con exactitud el valor de todos estos factores. Evidentemente no conocer el valor de un factor dinámico afecta de forma negativa a la calidad de predicción del método, debido a la falta de precisión o incertidumbre en el valor utilizado por el modelo. Por esta razón resulta fundamental mejorar la certeza acerca de los valores de los parámetros del modelo para llevar a cabo predicciones más realistas.

Afortunadamente, la incertidumbre puede reducirse a través de la utilización de diversos métodos que analicen la tendencia del comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones. Dentro de la taxonomía, cabe destacar la rama de métodos conducidos por datos de solución múltiple solapada, los cuales involucran la estadística, y cuyo principal antecedente lo constituye el método S^2F^2M [2]. Combinando la estadística con el uso de metaheurísticas, el método ESS (Evolutionary Statistical System) es un método de simulación y predicción computacional que combina estrategias estadísticas en conjunto con computación evolutiva para orientar la predicción hacia una mejor aproximación [6]. Además, ESS utiliza herramientas de computación de alto desempeño para acelerar el proceso de predicción, de manera tal de obtener buenas soluciones en un tiempo de cómputo razonable.

Durante los últimos años, el método ESS ha sido estudiado en profundidad y se han propuesto diferentes mejoras con el objetivo de lograr una mejor calidad de aproximación.



Figura 1: Incendio forestal en la zona de Cholila, Chubut. Las llamas alcanzaron más de 10 metros de altura. Fuente de la imagen: www.infobae.com.

En la línea de investigación actual se pretende no sólo mejorar la calidad de la aproximación, sino también reducir el costo computacional que implica ejecutar la simulación en un entorno paralelo. Este último objetivo se desagrega en reducir la cantidad de unidades computacionales necesarias para lograr una buena predicción, y/o en lograr una reducción del tiempo de ejecución. Estos objetivos son importantes puesto que al reducir la cantidad de unidades de procesamiento (manteniendo la calidad de la aproximación) es posible hacer un uso más responsable de los recursos computacionales (a la vez que se ahorra energía), y se puede mejorar el tiempo de respuesta de la aplicación, obteniendo soluciones a más corto plazo, dando la posibilidad de aplicar acciones de manera anticipada sobre el avance del incendio.
Bajo este marco, presentamos el modelo ESSIM-DE (Evolutionary Statistical System with Island Model and Differential Evolution). En este modelo se utiliza una estrategia evolutiva alternativa a la utilizada por ESS, denominada Evolución Diferencial, y se incorpora un diseño paralelo basado en islas con migración grupal para obtener un espectro más amplio de posibilidades en la búsqueda de soluciones que conduzcan a una mejor aproximación, utilizando un entorno de ejecución con menor cantidad de unidades de cómputo.
El trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección "Algoritmos Evolutivos" presenta una descripción de la componente evolutiva de ESS, describe brevemente la metaheurística Evolución Diferencial utilizada en ESSIM-DE y presenta las principales estrategias de paralelización para los Algoritmos Evolutivos. La sección "Sistema Estadístico Evolutivo" describe el modelo ESS, del cual toma sus bases el nuevo modelo desarrollado. La sección "Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas y Evolución Diferencial" desarrolla las características del nuevo modelo ESSIM-DE. La sección "Experimentación y Análisis de Resultados" detalla cada caso de prueba utilizado, el entorno de ejecución y las métricas consideradas. Además, se incluyen diversos gráficos con los principales resultados obtenidos de la experimentación incluyendo un análisis de los mismos. Finalmente se expresan las conclusiones generales.

ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Los Algoritmos Evolutivos (AEs) son considerados métodos eficientes de búsqueda que pueden ser aplicados a problemas de optimización y están inspirados en las teorías de Charles Darwin acerca de la evolución de las especies [7]. En general, el método consiste en una serie de iteraciones, denominadas generaciones evolutivas, en las cuales un grupo de posibles soluciones al problema, denominados individuos, conforman una población. La población evoluciona a través de las generaciones imitando principios de selección natural y supervivencia. Cada individuo tiene asociado un determinado desempeño o aptitud frente al problema de optimización que se considere; este desempeño es calculado a través de la función que describe matemáticamente el problema a optimizar. La premisa subyacente en la evolución es que los

individuos más aptos sobrevivan a la siguiente generación, es decir, permanecerán aquellos individuos cuyo desempeño represente un mejor valor como solución posible del problema.
Cada EA puede representar las soluciones de diferentes maneras: permutaciones, cadenas binarias, números enteros, números reales, matrices de números de punto flotante, etc. Ante un problema de optimización, los individuos codifican las diferentes variables involucradas en el sistema. Por ejemplo, si consideramos el problema de aproximar la línea de fuego en un simulador de incendios forestales, cada individuo puede representar un escenario que describa las características del terreno y de las condiciones ambientales (pendiente, tipo de vegetación, humedad, velocidad del viento, dirección del viento). Encontrar aquella combinación de características que determine un mejor comportamiento respecto de la línea de fuego actual significa determinar cuál es el individuo que mejor se desempeña en la generación actual.
Los EAs permiten que los mejores individuos tengan mayor probabilidad de reproducirse para poder generar nuevas soluciones de buena calidad. Esto lo logran a través de tres operadores: cruzamiento, mutación y selección. Los EAs se diferencian entre sí de acuerdo a cómo se definen en cada uno estos tres operadores. A continuación describiremos el EA utilizado en este trabajo: Evolución Diferencial.

Evolución Diferencial
El algoritmo Evolución Diferencial (DE) se clasifica dentro de los Algoritmos Evolutivos y ha sido utilizado con éxito en diferentes problemas de optimización de funciones [8]. En su esquema de mutación, utiliza diferencias de vectores para orientar la búsqueda hacia soluciones de mejor calidad. DE comienza generando una población inicial de individuos con valores aleatorios dentro de los rangos del problema. Cada individuo está representado por un vector de números reales y codifica una posible solución del problema. Como en todo EA, los individuos evolucionan a través de las generaciones por medio de los operadores de mutación, cruzamiento y selección. El objetivo del operador de mutación y cruzamiento es generar nuevos individuos a partir de individuos existentes. Luego, la etapa de selección determinará si los nuevos individuos generados son mejores que el individuo corriente. La gráfica de la Figura 2 describe en rasgos generales la entrada y la salida de cada etapa evolutiva de DE.
En cada generación *g* se recorre la población y por cada individuo Xi,g el proceso de mutación consiste en seleccionar al azar tres individuos de la población diferentes entre sí (Xr1,g, Xr2,g y Xr3,g). Estos tres individuos son utilizados en un operador de recombinación basado en la diferencia de vectores para generar un nuevo vector Vi,g, denominado "vector mutante".
En la etapa de cruzamiento, el vector mutante es combinado con el individuo Xi,g para generar un nuevo vector Ui,g, denominado "vector *trial*". Este vector posee características de ambos progenitores y la herencia es regulada por un parámetro del algoritmo denominado probabilidad de cruzamiento. Finalmente, en la etapa de selección se determina el mejor candidato entre el individuo corriente Xi,g y el vector trial Ui,g. Aquel que tenga mejor valor respecto de la función a optimizar será el que sobrevivirá a la generación siguiente, es decir siendo *f* la función a optimizar, Ui,g reemplaza a Xi,g si y solo si $f(Ui,g)<f(Xi,g)$ (para problemas de minimización), caso contrario, no ocurre reemplazo o selección.

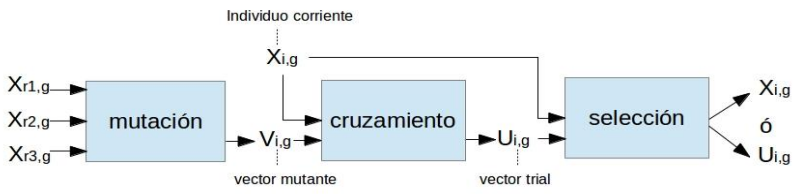


Figura 2: Etapas evolutivas de Evolución Diferencial.

Como puede observarse, el algoritmo DE sigue un esquema de procesamiento secuencial, iterando sobre la población a través de las generaciones y aplicando los operadores evolutivos descriptos anteriormente. Si bien DE tiene un gran potencial y ha sido utilizado en una gran variedad de problemas de optimización concretos, su desempeño puede ser mejorado agregando modificaciones a la estructura de procesamiento original con el fin de obtener mejoras significativas [9]. A continuación se describen las principales estrategias de paralelización para los EAs y posteriormente se describe el modelo desarrollado para Evolución Diferencial.

Algoritmos Evolutivos Paralelos

Existen diferentes alternativas de paralelización para los EAs [10]. En general, consisten en un esquema Master-Worker [11], en donde un proceso denominado Master es el encargado de realizar tareas principales y/o globales y los procesos workers están destinados a realizar diferentes tareas, dependiendo del tipo de paralelización. Podemos clasificar las estrategias de paralelización en tres grandes grupos:

_Única población, evaluación en paralelo: Este esquema consiste de una única población administrada por el proceso Master, quien aplica los operadores evolutivos a los individuos, pero la evaluación de la función objetivo es delegada a los procesos workers. La Figura 3 (a) describe esta estrategia.

_Múltiples subpoblaciones, modelo de islas: Consiste en múltiples subpoblaciones organizadas en "islas" que son evolucionadas de manera individual e intercambian individuos ocasionalmente. Este intercambio de individuos es denominado "migración", y favorece la diversidad en cada una de las islas. El Master puede inicializar la población y distribuirla entre los procesos workers, o bien cada proceso Worker puede inicializar su propia población y aplicar sobre ella los operadores evolutivos. Dependiendo de la implementación, esta estrategia de paralelización puede reducir el tiempo de ejecución o propiciar la búsqueda de mejores soluciones comparado a la versión secuencial del EA. En la Figura 3 (b) se describe esta estrategia.

_Modelos híbridos, jerarquía de procesos: Las dos estrategias anteriores pueden combinarse para lograr un modelo jerárquico en el cual, en un nivel superior múltiples islas cooperan entre sí realizando el proceso evolutivo sobre sus poblaciones e intercambiando individuos; y en un nivel inferior, dentro de cada isla se puede distribuir cada individuo para que los procesos Worker evalúen la función objetivo. Esta estrategia jerárquica pretende combinar los beneficios de cada una de las estrategias que lo componen. La Figura 3 (c) describe esta estrategia.

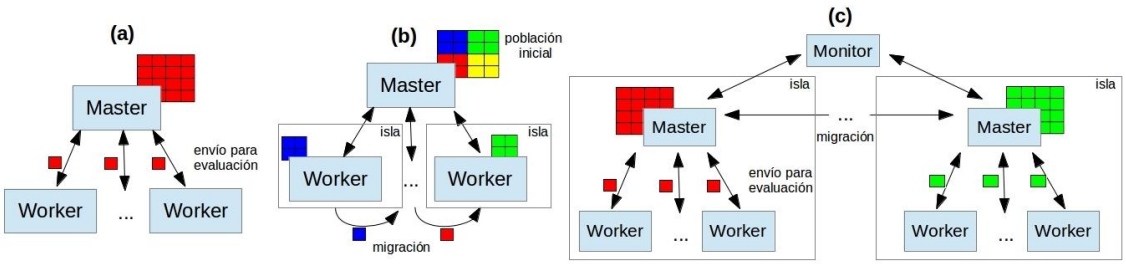


Figura 3: (a) Estrategia de única población (b) Estrategia de múltiple población y modelo de isla (c) Estrategia Jerárquica.

Dentro de las ventajas de utilizar estrategias de paralelización para algoritmos evolutivos encontramos las siguientes [12]:

_Acelerar la búsqueda: Uno de los principales objetivos es reducir el tiempo de ejecución, sobre todo en aquellos escenarios en donde el problema a optimizar requiere demasiado tiempo para encontrar soluciones de calidad aceptable.

_Mejorar la calidad de las soluciones encontradas: La utilización de metaheurísticas cooperativas altera el comportamiento del algoritmo original, logrando recorrer sectores del espacio de búsqueda aún no visitados.
_Resolver instancias del problema mayores: Gracias a la posibilidad de reducir el tiempo de ejecución, es factible ampliar la instancia del problema a una mayor dimensión y obtener soluciones que no podrían lograrse con un procesamiento secuencial.

A continuación se describe el Sistema Estadístico Evolutivo, un modelo de predicción que utiliza Algoritmos Evolutivos y que se encuentra enmarcado dentro de la estrategia de única población y evaluación en paralelo. Posteriormente, se describe el nuevo modelo desarrollado, denominado Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas y Evolución Diferencial (ESSIM-DE, por sus siglas en inglés), el cual se enmarca dentro de la estrategia de paralelización jerárquica, con múltiples poblaciones y modelo de islas.

SISTEMA ESTADÍSTICO EVOLUTIVO

ESS es un método de reducción de incertidumbre que utiliza Algoritmos Evolutivos Paralelos (AEPs) en su esquema de única población, el cual aplica evaluación en paralelo para optimizar la búsqueda de los parámetros que alimentan al modelo. Los parámetros de entrada en ESS están representados por individuos de una población determinada. Cada individuo está formado por un conjunto de valores que representan a cada uno de los parámetros de entrada del modelo.

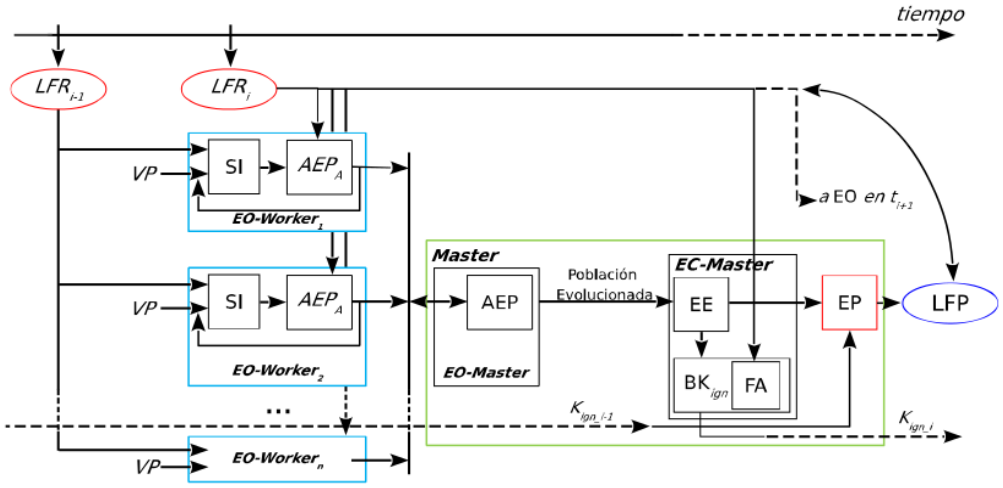


Figura 4: **Diagrama general de ESS. SI**: Simulador de Incendios,

AEP: Algoritmo Evolutivo Paralelo; **AEP*A***:Algoritmo Evolutivo Paralelo (evaluación de aptitud); **EO**: Etapa de Optimización; **EE:** Etapa Estadística; **BK**: Búsqueda de K-ign; **K-ign:** valor clave de ignición; **FA**: Función de Aptitud; **EC:** Etapa de Calibración; **EP:** Etapa de Predicción; **LFP:** Línea de Fuego Propuesta; **LFRx:** Línea de Fuego Real en el instante x; **VP:** Vector de Parámetros de entrada.

Tal como puede observarse en la Figura 4, la Etapa de Optimización **(EO-Worker)** es llevada a cabo por los procesos workers. Esta etapa realiza la evaluación de la aptitud de los individuos mediante dos sub-etapas internas denominadas Simulación de Incendios (**SI**) y Evaluación de Aptitud del AEP (**AEP*A***). **SI** debe ser alimentada con la línea de fuego real del incendio en el instante de tiempo t_{i-1} (**LFR*i-1***) junto con el vector de parámetros de entrada (**VP**). Cuando **SI** concluye con la simulación de los individuos, el resultado de cada simulación es introducido en la etapa **AEP*A*** para comparar el mapa simulado con el mapa real para el instante de tiempo *ti* (**LFR*i***). Aquí, según la diferencia entre el mapa simulado y el mapa real, se calcula el valor de aptitud para cada individuo. Evidentemente, el tiempo de ejecución del método dependerá de la

cantidad de *n* instancias **EO-Worker** que puedan llevarse a cabo en paralelo. Es importante notar que todo individuo procesado por **EO-Worker** debe haber sido enviado de forma explícita desde el proceso Master a los respectivos wokers. En el proceso Master también se lleva a cabo el resto del procesamiento del AEP (es decir, la generación de la población, la selección de individuos, el cruzamiento y la mutación) y las funciones de comunicación con cada uno de los workers. Una vez que la población alcanza cierto nivel de aptitud, es introducida en la Etapa de Calibración (**EC-Master**). En esta etapa la población que ha evolucionado alimenta a una sub-etapa denominada Etapa Estadística (**EE**). La salida de **EE** es un mapa de probabilidad que es utilizado en la sub-etapa **BK-ign** (búsqueda del valor clave de ignición **K-ign**) para calcular el patrón de comportamiento del incendio. El valor hallado, **K-ign**, es utilizado para realizar la predicción para el próximo instante de tiempo(t_{i+1}). La evaluación de la aptitud del mapa de probabilidad se lleva a cabo en la etapa que implementa la Función de Aptitud (**FA**). Además, la salida **BK-ign** se combina con el mapa de probabilidad proporcionado por **EE** para generar la predicción (**LFP**) en la Etapa de Predicción (**EP**).
Como se puede observar, ESS está basado en un modelo Master-Worker, donde en cada iteración el proceso Master distribuye los individuos entre los procesos workers, los cuales son encargados de realizar la evaluación de la aptitud de los individuos en forma paralela para luego retomar los resultados al Master. Luego de que toda la población ha sido evaluada, el Master evoluciona la población, incluye los resultados parciales y realiza la predicción para el siguiente instante de tiempo.

SISTEMA ESTADÍSTICO EVOLUTIVO CON MODELO DE ISLAS Y EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

ESSIM-DE fue desarrollado con dos objetivos principales. Por un lado, se diseñó con el objetivo de mejorar la calidad de la predicción de ESS mediante el incremento en la diversidad de los individuos generados por la componente evolutiva diferencial del método y por el modelo de migración grupal entre las islas que componen el modelo. Por otro lado, se pretende reducir la cantidad de unidades de procesamiento para lograr una buena calidad de aproximación a un costo computacional y/o temporal menor respecto de ESS.
Tomando como base al sistema ESS, el Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas y Evolución Diferencial (ESSIM-DE) utiliza como metaheurística principal a Evolución Diferencial para orientar la búsqueda hacia mejores soluciones en cada paso de simulación.
El concepto de isla está asociado al esquema de procesamiento *Master-Worker*, en donde un proceso Master es el encargado de administrar una población de individuos y delegar ciertos cálculos a los procesos workers. El Modelo de Islas consiste organizar los procesos en islas, cada una con una población diferente, las cuales intercambian individuos de manera periódica a través del proceso de *migración*. Desde una visión jerárquica, los procesos están organizados en dos niveles. En una jerarquía superior un proceso denominado Monitor es el encargado de administrar las diferentes islas, a través de la comunicación con cada una de ellas.
El Monitor se encarga de enviar información de inicialización a cada isla, de recolectar los datos procesados en la etapa final de la simulación y de determinar los valores de salida, identificando cuál es la isla que ha resultado con mejor aptitud.
La Figura 5 describe el diagrama general de ESSIM-DE. Se puede observar que el componente "**Monitor**" está relacionado con cada componente "**Isla**" a través de la comunicación antes mencionada. Por su parte, el nivel inferior de jerarquía responde a un esquema de "isla". En cada isla un proceso Master es el encargado de inicializar la población inicial y aplicar los operadores de mutación y cruzamiento del proceso evolutivo para generar nuevos individuos. Para determinar si los nuevos individuos generados permanecerán en la generación siguiente, el Master distribuye cada individuo generado entre ciertos procesos workers, quienes evalúan el

desempeño individual de cada uno aplicando la función de *fitness* y retornando al Master la evaluación obtenida.
En la Figura 5, la comunicación entre el Master y los workers está representada por flechas de doble dirección que unen los componentes "**Master"** y "**EO-Worker"**. Luego, el proceso Master recibe los resultados de la evaluación realizada por los workers y determina si los individuos generados en el proceso de mutación y cruzamiento sobrevivirán a la siguiente generación, verificando si el *fitness* calculado por los workers es mayor al *fitness* del individuo corriente, en cuyo caso, el nuevo individuo generado reemplaza al individuo corriente. Este proceso se realiza para cada individuo de la población. Tal como puede observarse en la Figura 5, la Etapa de Calibración (**EC-Master**) realiza funciones de comunicación con el nodo monitor en la jerarquía superior, y la Etapa de Optimización **(EO-Master)** realiza lo mismo con los workers en la jerarquía inferior. El funcionamiento detallado de los niveles de ESSIM-DE se resume en dos Etapas de Optimización **(EO-Worker** y **EO-Master**), dos de calibración (**EC-Master** y **EC-Monitor**) y una Etapa de Predicción (**EP**).

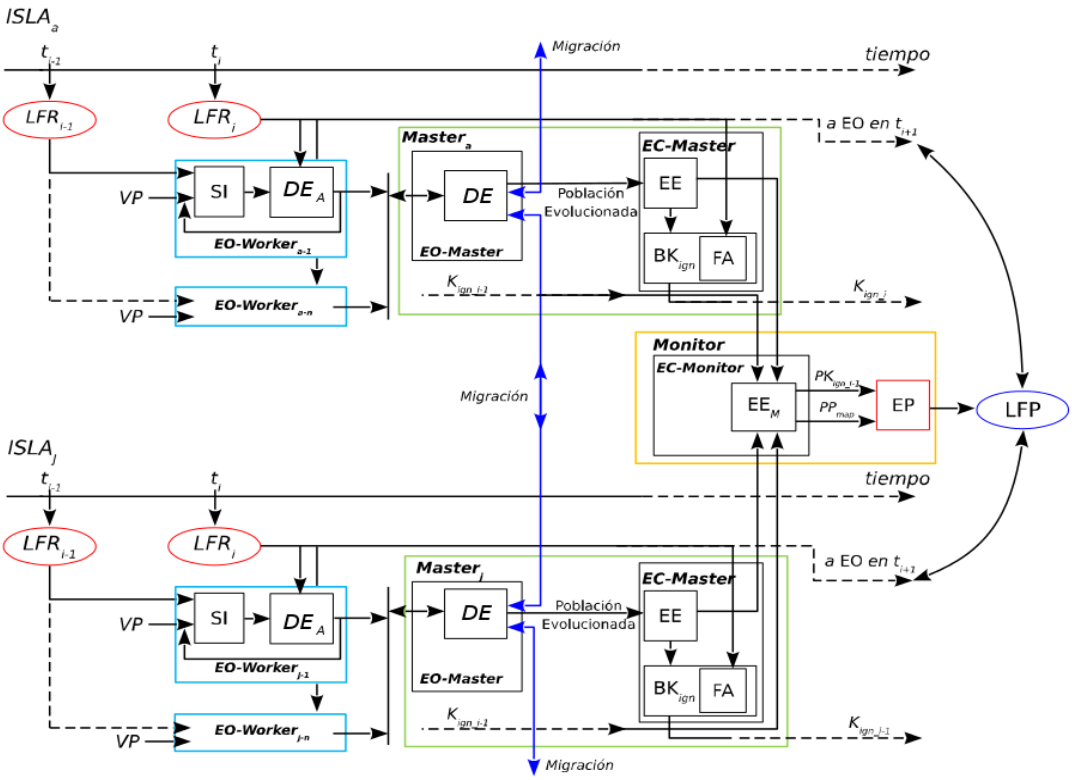


Figura 5: Diagrama General de ESSIM-DE. **SI**: Simulador de Incendios, **DE**: Evolución Diferencial; **DE*A***: Evolución Diferencial (evaluación de aptitud); **EO**: Etapa de Optimización; **EE:** Etapa Estadística; **BK**: Búsqueda de K-ign; **K-ign:** valor clave de ignición; **FA**: Función de Aptitud; **EC:** Etapa de Calibración; **EP:** Etapa de Predicción; **LFP:** Línea de Fuego Propuesta; **LFRx:** Línea de Fuego Real en el instante x; **VP:** Vector de Parámetros de entrada; **EE*M*:** Etapa Estadística Monitor; **PK-ign:** Valor clave de ignición pre-calculado; **PP:** Mapa de Probabilidad pre-calculado.

La etapa **EO-Worker** efectúa la evaluación de la población mediante la función de aptitud. En cada isla opera una **EO-Master**, que es responsable de llevar a cabo la evolución de la población utilizando el algoritmo Evolución Diferencial (**DE**) y de efectuar la migración grupal de individuos hacia otra isla. Es importante remarcar que en la etapa de migración se selecciona un conjunto de individuos de la población actual para ser enviados a otra isla. Entre los

individuos seleccionados se incluyen los dos mejores de la población (aquellos dos que tengan los mejores valores de aptitud) y el resto del conjunto es seleccionado al azar. La comunicación entre islas sigue un orden topológico de anillo, es decir, las islas son numeradas en orden creciente y cada una envía a la isla sucesora y recibe datos desde la isla predecesora. Los individuos que arriban reemplazan a los peores individuos de la población destino. La cantidad total de individuos que migran hacia otra isla es un parámetro del algoritmo. Esta migración grupal permite incrementar la diversidad poblacional en cada isla, a partir de la incorporación de nuevos individuos que han evolucionado con las características de la población de la isla de partida, y que se incorporarán, evolucionarán y desarrollarán en la población destino.
En la etapa **EC-Master,** la salida de **EE** se envía a **EC-Monitor** junto con los *j* valores de **K-ign** calculados por las *j* islas. En la Etapa **EC-Monitor** el nodo Monitor selecciona el mejor valor de **K-ign** entre los obtenidos por cada isla. El valor hallado **K-ign** es utilizado por el monitor para realizar la predicción para el próximo instante de tiempo(t_{i+1}).
Resaltando las diferencias entre ESS y ESSIM-DE tenemos, por un lado, que ESS posee un esquema de única población, a diferencia de ESSIM-DE, el cual posee múltiples poblaciones organizadas en islas, que se comunican entre sí a través del operador de migración grupal permitiendo explorar un espacio de búsqueda mayor. Por otro lado, ESS utiliza como metaheurística Algoritmos Evolutivos, mientras que ESSIM-DE utiliza Evolución Diferencial en su componente evolutiva. Finalmente, cabe enfatizar que ESSIM-DE posee dos jerarquías de procesos: en cada isla un proceso Master administra los individuos y los envía a los procesos workers, (quienes calculan la función de aptitud para cada uno), y un proceso Monitor es el encargado de recolectar la información de cada isla, y determinar cuál es la isla con mejor aptitud para predecir el valor de ignición del siguiente paso de simulación. En contraste, ESS solo posee un nivel de jerarquía (Master-Worker).

EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se describe detalladamente la experimentación llevada a cabo con ESS y ESSIM-DE, incluyendo los casos de prueba considerados, las características del entorno de ejecución y la función de aptitud considerada en la evaluación.

Casos de prueba
Para analizar la calidad de predicción de los modelos ESS y ESSIM-DE se han utilizado dos casos reales de estudio correspondientes a incendios controlados realizados en diferentes terrenos ubicados en Portugal (precisamente en Serra de Lousã, Gestosa), todos pertenecientes al proyecto SPREAD [13]. Cada caso posee una determinada duración expresada en minutos, una pendiente en grados y una superficie específica en metros cuadrados. El período de duración total de cada incendio ha sido dividido en lapsos menores de tiempo denominados pasos de simulación. En la Tabla I puede observarse la información detallada para cada caso de prueba considerado.

Tabla I: Dimensiones, pendiente, tiempos e incremento de cada caso de prueba

Caso	Ancho (mts)	Largo (mts)	Pendiente (grados)	Inicio (min.)	Fin (min.)	Incremento (min.)
520	89	109	21	2.0	14.0	2.0
533	95	123	21	4.0	12.0	2.0

Configuración del entorno de ejecución paralelo

La experimentación ha sido diseñada para evaluar la calidad de predicción alcanzada por cada método bajo un entorno de ejecución paralelo. Los resultados obtenidos con ESS fueron ejecutados utilizando un proceso monitor y 40 procesos workers, haciendo un total de 41 procesos en ejecución. Por su parte, ESSIM-DE fue configurado con 3 islas y 7 workers por isla. Como cada isla es administrada por un proceso Master, y las islas coordinadas por un proceso monitor, ESSIM-DE fue entonces ejecutado utilizando 25 procesos, por lo tanto la configuración fue definida con una reducción de la cantidad de unidades de procesamiento en un 40% respecto de ESS.

Función de aptitud para la evaluación de la calidad de predicción

La calidad de predicción tanto de ESS como de ESSIM-DE es evaluada mediante una función de aptitud basada en el índice Jaccard. Conceptualmente se particiona el terreno en celdas cuadradas debido a que el simulador utiliza una aproximación basada en celdas. La siguiente ecuación muestra la expresión:

$$Aptitud = \frac{(A \cap B)}{(A \cup B)} \quad (1)$$

donde A representa el conjunto de celdas en el mapa real sin el subconjunto de celdas quemadas antes de iniciar las simulaciones, y B representa el conjunto de celdas en el mapa simulado sin el subconjunto de celdas quemadas antes de comenzar la simulación. La corrección en el conjunto de celdas mediante la eliminación del subconjunto de celdas quemadas se utiliza para evitar resultados sesgados.

El valor de la Ec. 1 se encuentra en el rango [0,1], una aptitud de 1 corresponde a una predicción perfecta, puesto que la superficie predicha es igual a la superficie real quemada. Una aptitud igual a cero, indica el máximo error, puesto que el área quemada del incendio real no coincide en absoluto con el área quemada obtenida en la simulación.

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se resumen en los gráficos de la Figura 6. En cada gráfico se representa en el eje Y el valor de aptitud alcanzado por cada método, y en el eje X la línea de tiempo que se corresponde con el avance del incendio, representado por cada paso de simulación. Para poder analizar el desempeño de los modelos respecto del tiempo de ejecución y de las unidades de procesamiento utilizadas, se presentan el gráfico de la Figura 7, donde se describen los resultados temporales obtenidos con cada método respecto del tiempo de ejecución y se incluye la cantidad de procesos utilizados.

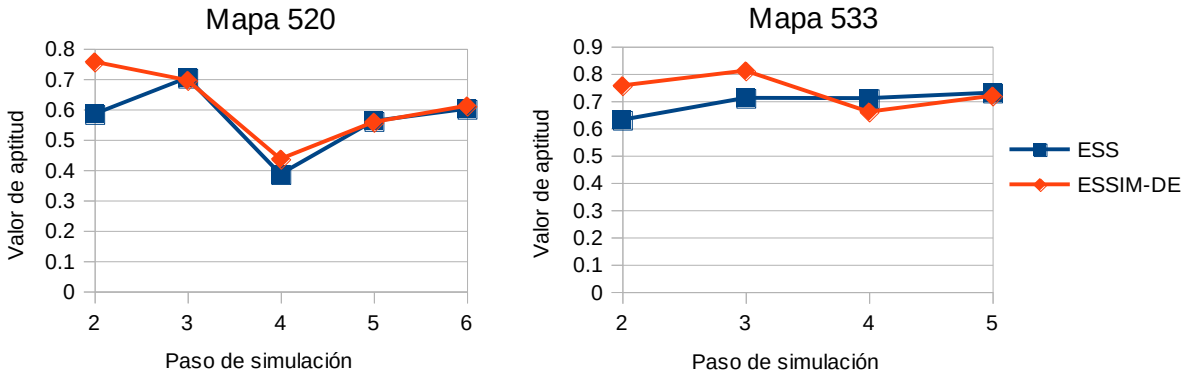


Figura 6: Comparación de calidad de predicción

obtenida por cada método, para los dos casos considerados.

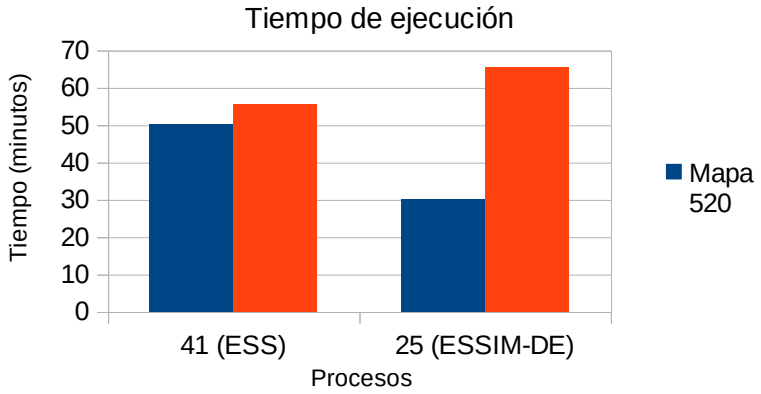


Figura 7:
Comparación de tiempos de ejecución de cada método respecto de unidades de cómputo para los mapas considerados.

DISCUSIÓN

El desempeño del modelo ESSIM-DE puede ser analizado bajo tres diferentes métricas: evaluación de la calidad de la predicción, evaluación del tiempo de ejecución y evaluación de la cantidad de recursos computacionales utilizados.
La primera métrica de calidad refiere a cuál es el grado de precisión que el método ESSIM-DE alcanza respecto de la línea de fuego real del incendio. Para analizar esta métrica podemos observar los gráficos de la Figura 6. Es posible observar que ESSIM-DE obtiene mejoras en los valores de aptitud para ciertos pasos de simulación de ambos mapas. A excepción del paso de simulación 4 para el mapa 533, en general ESSIM-DE obtiene una mejora de hasta un 25%, sobre todo en los primeros pasos de simulación. Gracias a la incorporación de múltiples islas, el espacio de búsqueda se amplia de manera considerable, implicando mayor posibilidad de encontrar soluciones de calidad.
Un aspecto importante a tener en cuenta en los modelos de simulación es el tiempo en el cual el modelo permite obtener resultados para poder ser utilizados en un entorno real. El gráfico de la Figura 8 muestra los resultados temporales de las ejecuciones de ambos modelos, para cada mapa considerado. Además, en leyenda del eje X se describe la cantidad de unidades de cómputo utilizadas para las pruebas. Podemos notar para el mapa 520 que ESSIM-DE obtiene una reducción de más del 40% del tiempo de ejecución. Mientras que para el mapa 533, ESSIM-DE presenta un leve incremento en el tiempo de ejecución. Sin embargo, todas las ejecuciones tanto para el mapa 520 como para el mapa 533, fueron realizadas con una reducción de aproximadamente un 40% menos de unidades de cómputo. Esto implica que el modelo ESSIM-DE no solo logra mejorar la calidad de la aproximación, sino que lo realiza a un costo computacional menor que ESS, alcanzando una reducción significativa del tiempo de ejecución para uno de los dos mapas considerados. Es importante remarcar que como cada mapa posee características particulares, los métodos deben ser calibrados de manera independiente para cada caso. Por este motivo, a futuro se pretende estudiar y desarrollar un modelo de ajuste dinámico de parámetros de control, a través de métodos de sintonización que logren calibrarlos dinámicamente.

CONCLUSIONES

Los incendios forestales representan una gran amenaza tanto para la población como para la biodiversidad de las zonas afectadas. Por tal motivo, se hace necesario el estudio de métodos que ayuden a predecir su comportamiento con el objetivo de minimizar pérdidas y/o generar planes de evacuación de las zonas potencialmente afectadas.
Como generalmente los modelos de simulación para este tipo de fenómenos presentan incertidumbre sobre los parámetros de entrada, se hace necesario el desarrollo de métodos que permitan reducir dicha incertidumbre para que las predicciones sean lo más cercanas posible a la realidad. Además, es esperable que los resultados de predicción sean obtenidos en un tiempo de respuesta aceptable. El uso de estrategias de computación en paralelo puede no sólo acelerar el proceso de predicción, sino también lograr obtener soluciones de mayor calidad.
En este trabajo se ha presentado ESSIM-DE (Evolutionary-Statistical System with Island Model and Differential Evolution), un modelo de simulación que utiliza el algoritmo evolutivo Evolución Diferencial y evaluación en paralelo bajo un Modelo de Islas con migración grupal. ESSIM-DE fue aplicado al problema de la predicción de la línea de fuego de incendios forestales, demostrando alcanzar resultados de calidad, a un costo temporal menor que su predecesor ESS (Evolutionary-Statistical System) para el mapa 520 y utilizando aproximadamente un 40% menos de recursos computacionales. Como trabajos futuros se planea trabajar en la sintonización estática y dinámica de los parámetros operacionales del modelo ESSIM-DE, con el objetivo de lograr un entorno auto-ajustable de ejecución que permita mejorar las diferentes métricas de calidad independientemente del mapa considerado. También se planea utilizar la estrategia de paralelización con sub-poblaciones, con el objetivo de mejorar aún más la calidad de la aproximación y/o lograr mejores tiempos de respuesta.

REFERENCIAS

[1] E.A. Johnson, K. Miyanishi, *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*, Academic Press, Orlando, Florida, 2001.
[2] G. Bianchini, A. Cortés, T. Margalef, E. Luque: *S2F2M-Statistical System for Forest Fire Management, LN*CS **3514** (2005) 427-434.
[3] P.L. Andrews, C.D. Bevins, Seli, Robert C, *BehavePlus fire model-ing system, version 2.0: User's Guide*. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2003.
[4] M.A Finney, *FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation*, Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998.
[5] ADAI Products: FIRESTATION http://www.adai.pt/products/firestation/
[6] G. Bianchini, P. Caymes Scutari, M. Mendez Garabetti: Evolutionary-Statistical System: A parallel method for improving forest fire spread prediction. Journal of Computational Science **6** (2015) 58-66.
[7] C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, London, Murray, 1859.
[8] Price, K., Stron R., Lampinen J., *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer, New York, 2005.
[9] M.L. Tardivo, P. Caymes Scutari, M. Méndez Garabetti, G. Bianchini, Sintonización Estática de Parámetros Operacionales para un Modelo Paralelo de Evolución Diferencial, 1er Congreso Nacional de Ingeniería Informática y Sistemas de Información, ISSN: 2346-9927. (2013) 770-779.
[10] E. Cantú Paz, *A Survey of Parallel Genetic Algorithms*, CALCULATEURS PARALLELES, vol 10 (1998).

[11] T. Matson, B. Sanders, B. Massingill, *Patterns for Parallel Programming.* Addison-Wesley, 2005.
[12] E.G. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation,* John Wiley & Sons, Inc., 2009.
[13] D. X. Viegas, *Project Spread – Forest Fire Spread Prevention and Mitigation,* http://www.algosystems.gr/spread/ (2004).

HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DEL RÍO TECKA-GUALJAINA, CHUBUT, ARGENTINA

Torrero Mariana P.[a]

[a]*Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería – PEPACG. Pontificia Universidad Católica "Santa María de los Buenos Aires". Av. Alicia M. de Justo 1600 – Piso 3. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ARGENTINA*

e-mail: mptorrero@gmail.com

RESUMEN

El Río Tecka nace en las sierras occidentales de la provincia de Chubut, Argentina, a 1.350 msnm. Fluye inicialmente en sentido O–E y luego tomar rumbo S–N hasta su desembocadura en el Río Chubut. En la afluencia del Arroyo Pescado, el Río Tecka toma el nombre de Río Gualjaina dando nombre a la cuenca del Río Tecka–Gualjaina de 5.318 km2. A lo largo de su recorrido, el río atraviesa distintas áreas moldeadas a través del tiempo por numerosos procesos geológicos y morfogenéticos. La vegetación predominante es de estepa subarbustiva-graminosa. El clima es desértico templado con precipitaciones predominantemente invernales. El objetivo del trabajo es caracterizar y analizar la hidrografía a fin de determinar el comportamiento hidrológico. Los resultados determinaron una cuenca de orden 6. El Arroyo Lepá es el principal tributario, se localiza en la cuenca baja y desarrolla una subcuenca de 1.546 km2, la mayor de un total de 30 mucho más pequeñas, que integran esta cuenca. En segundo lugar se encuentra la subcuenca del Río Tecka con un poco menos de 1150 km2. La baja densidad de drenaje (0,40 km/km2) refleja una cuenca pobremente drenada y la misma se asocia con una textura de drenaje gruesa, sin embargo, dentro del espacio de la cuenca se pueden distinguir diferentes áreas con texturas de drenaje que varían desde el tipo gruesa en la cuenca media y baja a más fina en la cuenca alta. El conocimiento de las características hidrográficas de la cuenca del Río Tecka-Gualjaina sumado a las características geomorfológicas, geológicas y de cobertura vegetal, contribuyen a determinar el comportamiento del escurrimiento superficial tratándose en este caso de una cuenca con poca capacidad de almacenamiento durante las crecidas y por ende, con un creciente riesgo de erosión.

Palabras Clave: Red de drenaje, subcuencas, parámetros físicos

INTRODUCCIÓN

El Río Tecka nace en las sierras occidentales de la provincia de Chubut, Argentina, a 1.350 msnm, a los 43°35'18 Lat. S y 71°21'03 Long. O. Fluye inicialmente en sentido O – E durante unos 45 km, para luego tomar rumbo S – N hasta su desembocadura en el Río Chubut. En la afluencia del Arroyo Pescado, 43°02'22'' Lat. S; 70°47'23'' Long. O, el Río Tecka toma el nombre de Río Gualjaina; entre ambos poseen una longitud de 206 km. Estos ríos, dan nombre a la cuenca Tecka – Gualjaina de 5.318 km^2 que forma parte de la cuenca exorreica de vertiente atlántica del Río Chubut (ver Figura 1). Los puntos más altos son el de 2.210 m en la cuenca baja, al NO, en el Cordón de Esquel y el de 1.988 m en la cuenca alta, al Oeste, en el Cerro

Cuche que forma parte del Cordón Kakel. Al SE, se localizan los Cerros Montgomery (1.655 m) y Mogote (1.611 m) y al E, en la Sierra de Tecka, el Cerro Araneda (1.448 m).

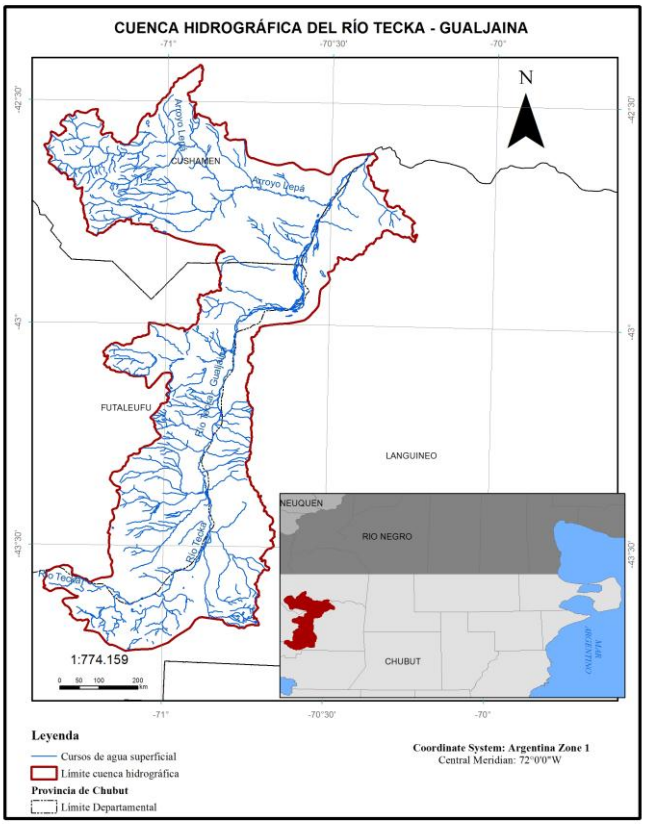


Figura 1. Cuenca del Río Tecka – Gualjaina, Chubut, Argentina.
Fuente: Elaboración propia sobre la base de cartas topográficas del IGM, escala 1:100.000 [1].

El clima de la región es árido y frío, las precipitaciones, concentradas en invierno, no superan los 200 mm anuales y la temperatura media anual es de 10ºC. El período 1993-2008 presentó condiciones de aridez y déficit hídrico con un tipo climático árido mesotérmico o estepa y un régimen del río del tipo nivo-pluvial [2]. El valle se caracteriza por una llanura aluvial con áreas cóncavas, inundables y terrazas bajas [3]. Los suelos predominantes son Aridisoles Calciortides, Natrargides, Paleoargides y Paleortides; Inceptisoles Distrandeptes y Molisoles Criacuoles, Haploboroles y Haploxeroles [4]. El área se caracteriza por el desarrollo de mallines, de gran importancia ecológica y potencial productivo, los cuales se encuentran degradados o destruidos como consecuencia de procesos naturales o por la intervención antropogénica. La vegetación predominante es de estepa subarbustiva-graminosa [5].

El curso del río divide los departamentos chubutenses de Languiñeo, al Este, y de Futaleufú y Cushamen, al Oeste. Estos dos últimos limitados entre sí por el paralelo de los 42°52’ Lat S. A nivel antrópico, se destaca la presencia de la ciudad de Tecka, cabecera del departamento Languiñeo, y del poblado de Gualjaina, a orillas del Arroyo Lepá, principal afluente del Río Gualjaina. Tecka, cuya principal actividad es ganadera y en menor medida se realiza el cultivo sobre las planicies de inundación, es atravesada por la Ruta Nacional N°40, la cual cruza el río del mismo nombre y acompaña su curso hasta su confluencia con el Arroyo Pescado. La Ruta Nacional N°25, por su parte, corre por el valle del Arroyo Pescado y cruza el Río Tecka – Gualjaina para luego tomar rumbo SE. A lo largo de su recorrido, el río atraviesa

distintas áreas moldeadas a través del tiempo por numerosos procesos geológicos y morfogenéticos.

OBJETIVO

El objetivo del trabajo es caracterizar y analizar la hidrografía a fin de determinar el comportamiento hidrológico.

MATERIALES Y METODOS

El procesamiento de los datos se realizó con el programa ArcGis 9.3.1 [6]. La información se obtuvo de las cartas topográficas elaboradas y editadas por el Instituto Geográfico Militar [1]: Piedra Parada, 4369-7; Paraje La Horqueta, 4369-13; Cholila, 4372-11; Fofó Cahuel, 4372-12; Esquel, 4372-17; Gualjaina, 4372-18; Trevelín, 4372-23; Arroyo Pescado, 4372-24; Corcovado, 4372-29; Tecka, 4372-30; Cerro Caballada 4372-35; Putrachoique, 4372-36. La cartografía que se utilizó fueron cartas topográficas a escala 1:100.000, por ser el tipo de documento cartográfico a mayor escala que abarcaba toda el área de esta cuenca hidrográfica. Se georreferenciaron las cartas topográficas, se digitalizaron las curvas de nivel y cursos de agua y se trazaron las subcuencas.

Para la delimitación de la cuenca de drenaje y subcuencas, se identificó la divisoria de aguas siguiendo la dirección de las pendientes de acuerdo con las curvas de nivel [7]. Para la caracterización morfológica se obtuvieron el área o superficie de la cuenca, el perímetro, el relieve disponible y la longitud del río. Se calcularon también, el factor de forma y el radio de elongación. Para obtener la forma del contorno de la cuenca, se calculó el índice de compacidad o de Gravelius y coeficiente de redondez. Para determinar la forma de la cuenca se utilizaron los siguientes índices:

- Relieve disponible

El relieve disponible, ΔH, es la diferencia de altura entre el punto más alto (H_x) y más bajo de la cuenca (H_y):

$$\Delta H = H_x / H_y$$

- Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca, Pm, se obtiene multiplicando la equidistancia (D) por la sumatoria de la longitud de todas las curvas de nivel (P) dividido por el área de la cuenca.

$$Pm = (P * D) / A$$

- Factor de forma

El factor de forma, R_f, es el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima [8, 9]:

$$R_f = A / L^2_m$$

En función de lo propuesto por Jardí [10] y a fin de analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca, se decidió obtener como valor de L_m, la longitud máxima entre los puntos extremos de la cuenca siguiendo el cauce del río principal. El radio o relación de elongación, R_e, definido por Schumm como la relación entre el diámetro de un círculo de igual superficie que la cuenca y la longitud máxima de la misma (L). El diámetro se expresa en función del área de la cuenca (A) como [11]:

$$R_e = 1{,}128\ \sqrt{A/L}$$

Valores inferiores a 1 indican que la cuenca tiene forma alargada, cuanto menor sea R_e más alargada será la forma [10].

- Amplitud de cuenca

La amplitud de la cuenca, W, indica la superficie de la cuenca por unidad de longitud de la misma.

$$W = A / L_b$$

La tendencia de esta variable es que, a mayor elongación de la cuenca, menor será el valor que tome W, pero siendo en todos los casos, superior a 1. Es decir, los valores altos de W implicarán cuencas más anchas y valores más bajos de W, pero siempre encima de 1, implicarán cuencas elongadas [10].

El coeficiente de redondez, K, relaciona el área de la cuenca, A, con su longitud, L, tomando como referencia el diámetro de un círculo. Para cuencas perfectamente circulares K, toma un valor igual a la unidad y cuanto más elongada sea la cuenca, mayor será el valor de K. Esta variable fue introducida por Seyhan en 1977 [10]:

$$K = \pi L^2 / 4 A$$

El índice o coeficiente de compacidad o de Gravelius [12], Kc, es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo de igual superficie que la cuenca. Llamas [11] define la siguiente expresión:

$$Kc = 0{,}28 * (P / \sqrt{A})$$

Donde P y A son el perímetro y la superficie de la cuenca, respectivamente. El coeficiente será igual a la unidad en cuencas perfectamente circulares pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas.

Asimismo, se determinaron las variables lineales que corresponden al patrón de drenaje de la cuenca del Río Tecka-Gualjaina, éstas son: la jerarquía, la relación de bifurcación, la relación de longitud, la densidad de drenaje, el coeficiente de almacenamiento, el coeficiente de torrencialidad, la frecuencia de drenaje, el tiempo de concentración, la pendiente media del cauce principal, el índice de sinuosidad topográfica y la constante de estabilidad del río.

- Jerarquía del drenaje

El análisis de la red de drenaje se realizó según el sistema introducido por Horton [9] y modificado por Strahler [13] que considera que el número de orden es directamente proporcional al tamaño y caudal de la cuenca. El método propuesto por Horton se basa en el análisis de la clasificación de los cursos de agua como segmentos en orden creciente de importancia según su posición jerárquica en la red de drenaje. El sistema asume que no existen uniones triples y que el número de orden se incrementa aguas abajo. En consecuencia, considera cursos de orden uno a los arroyos en sus nacientes sean temporarios o permanentes. La unión de dos cursos de igual orden da lugar a la formación de un curso de orden superior y así sucesivamente. Por lo tanto, la jerarquía que adquiera la red será el mayor valor que tome el último curso de agua el cual coincide con el curso principal.

- Relación de bifurcación

La relación de bifurcación, es una variable topológica que relaciona el número de cauces de un orden con el número de cauces de orden inmediatamente superior [9]. Es uno de los parámetros más significativos para evaluar el comportamiento del sistema fluvial [14].

$$Rb = N_u / N (_u + _1)$$

Según Strahler [15] valores entre 2 y 5 de Rb son característicos de los sistemas fluviales, según Woldenberg [16] los valores oscilan entre 3 y 7, indicando condiciones de equilibrio entre la red de drenaje y la topografía. Valores relativamente constantes entre un orden y el siguiente, implican similitud climática, litológica y estado de desarrollo uniforme [15]. Horton [9] estableció que según la ley de números de cauce, que dentro de una cuenca determinada, "el número de cauces de diferentes órdenes tiende a aproximarse a una progresión geométrica inversa en la que el primer término es la unidad y la razón es una relación constante de bifurcación".

- Relación de longitud

La relación de longitud, Rl, es la razón de incremento entre la longitud media de los cauces (Lu) y el orden de magnitud de los mismos ($_u$ - $_1$).

$$Rl = Lu / L (_u - _1)$$

La ley de longitud de los cauces enunciada por Horton sostiene que "la longitud media acumulada de segmentos de cauce de órdenes sucesivos tiende a formar una progresión geométrica cuyo primer término es la longitud media de los segmentos de primer orden y tiene por razón una relación de longitud constante". En general puede decirse que la longitud media de los cursos se triplica cada vez que aumenta el número de orden, siendo esta razón de incremento la relación de longitud. Dado que las longitudes medias de los cauces de un mismo orden difieren considerablemente de una cuenca a otra, no pueden generalizarse conclusiones respecto de este parámetro.

- Densidad de drenaje

La densidad de drenaje, Dd, es la relación entre la longitud total de los cursos de agua (L_u) y el área de la cuenca (A).

$$Dd = \sum L_u / A$$

Strahler [13] considera a la densidad de drenaje como una expresión del espaciamiento entre los cursos en el área de la cuenca donde la unidad de medición es km/km^2. Smith [17] considera que una cuenca está pobremente drenada cuando la Dd es inferior a 5 km/km^2. De igual forma, Benítez [18] cuando la densidad de drenaje es menor o igual a 0,6 km/km^2 la cuenca está insuficientemente drenada y bien drenada si la densidad de drenaje es mayor a 3 km/km^2. La densidad de drenaje de una cuenca está controlada por la litología (rocas más duras y resistentes tendrán menor densidad de drenaje que las friables), la facilidad de infiltración de los materiales (muy permeables tendrán baja densidad de drenaje) y la presencia o ausencia de cobertura vegetal. Una roca débil, bajo clima húmedo protegida por una espesa cobertura vegetal tendrá menor densidad de drenaje que la misma roca bajo clima árido donde dicha cobertura no existe.

- Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento, ρ, es el cociente entre la relación de longitud (Rl) y la relación de bifurcación (Rb) de la cuenca hídrica [9].

$$\rho = \sum Rl / Rb$$

Permite evaluar la capacidad de almacenamiento de la cuenca durante las crecidas. Cuando los valores tienden a la unidad está comprobado empíricamente que el agua meteórica tiende a ser almacenada en forma subterránea pasando a formar parte del acuífero, habrá por lo tanto menor riesgo de erosión hídrica de la cubierta superficial. En este caso podrán inferirse litologías y estructuras de los materiales sobre los cuales ha drenado el agua. Cuando los valores se alejan de la unidad es creciente el riesgo de erosión alcanzando la cuenca con mayor rapidez el "caudal de pico" en su desembocadura.

- Coeficiente de torrencialidad

El coeficiente de torrencialidad, T, resulta de dividir el número de cursos de primer orden por la superficie de la cuenca. El resultado se expresa en cursos por km^2.

$$T = \sum N_1 / A$$

Van asociados a áreas de climas áridos y semiáridos donde las lluvias torrenciales son características y originan numerosos cursos de orden 1. El resultado indica el estado de erodabilidad del espacio estudiado, el cual se encuentra íntimamente relacionado a los procesos de erosión lineal y a la capacidad de descarga de la cuenca. Teniendo en cuenta que los cursos de primer orden son de origen erosivo (erosión en surcos y en cárcavas), altos valores de este coeficiente indican una elevada suceptibilidad a la erosión, menor tiempo de llegada a la desembocadura y una alta torrencialidad. Los cursos de orden 1 son los más importantes en la generación de flujos torrenciales como así también de la generación de inundaciones aluvionales rápidas [19].

- Frecuencia de drenaje

La frecuencia de drenaje, Fd, es una medida no métrica que da el número de cauces por unidad de superficie.

$$Fd = \sum N_u / A$$

- Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, Tc, es el tiempo que tarda en llegar, a la sección de salida de la cuenca, la escorrentía producida en la zona más alejada de dicha sección. Depende del espacio recorrido (longitud y forma de la cuenca) y de la velocidad de las escorrentías (altura de la escorrentía, pendiente de la cuenca y del cauce principal, rugosidad de la superficie). La fórmula más frecuentemente utilizada es la de Kirpich [20]:

$$Tc = [(0{,}871\ L^3) / (H - h)]^{0{,}385}$$

En función de las características de la cuenca objeto de esta investigación y como resultado de los estudios y evaluaciones del área ya efectuadas, se decidió aplicar la fórmula propuesta por Hathaway-Kerby [21, 22] que considera las características superficiales del terreno. En la Tabla 1 se presentan los valores correspondientes a los distintos tipos de superficies en función de la vegetación.

$$Tc = (0{,}606\ (Ln)^{0{,}467}) / S^{0{,}234}$$

Donde, Tc, es tiempo de concentración en horas, L, la longitud del cauce principal hasta la divisoria, S, la pendiente media del cauce principal y n, la rugosidad en función de la vegetación.

Tabla 1. Valor asignado a la rugosidad del terreno en función de la vegetación. Fuente: Hathaway [21].

Tipo de superficie	Valor de n
Suelo liso impermeable	0,02
Suelo desnudo	0,10
Pastos pobres, cultivos en hileras o suelo desnudo algo rugoso	0,20
Pastizales	0,40
Bosque de frondosas	0,60
Bosque de coníferas, o de frondosas con una capa densa de residuos orgánicos o de césped	0,80

- Pendiente media del río

La pendiente media del cauce principal (Pm_r), es uno de los indicadores más importantes en el análisis hidrográfico empleado para determinar el grado de respuesta de una cuenca a una tormenta determinada. Dado que la pendiente varía a lo largo del cauce, se definió como tal, al desnivel entre los puntos extremos de la corriente principal dividido su longitud. El orden de magnitud se obtuvo de acuerdo con la Tabla 2. Siendo:

$$Pm_r = (H_M - H_m) / (1000 * L_r)$$

Donde, H_M y H_m son las alturas máxima y mínima, en metros, respectivamente y L_r, la longitud del río principal, en kilómetros.

Tabla 2. Magnitud de la pendiente media del río principal.

Pendiente media (%)	Terreno
< 1	Llano
1 − 5	Suave
5 − 8	Moderado
8 − 15	Fuerte
> 15	Escarpado

- Índice de sinuosidad topográfica

El índice de sinuosidad topográfica o coeficiente de sinuosidad, S_t, fue enunciado por Schumm [23] para reflejar el trazado del cauce como el cociente entre la longitud del valle, L_v y la del eje del río, L_e. Valores próximos a 1 indican que el cauce tiende a ser rectilíneo y valores superiores a 2 tienden a ser tortuosos, los resultados intermedios indican formas transicionales regulares o irregulares [23]. Pedraza Gilsanz [24] denomina rectilínos y meandrosos a los cauces con índices de sinuosidad menores o superiores a 1,5 respectivamente. Las longitudes empleadas en el cálculo son proyecciones de los valores reales sobre un plano horizontal. Para calcular las dimensiones reales hay que dividir esos valores por el coseno del ángulo que forma el eje del río con la horizontal [11]. Siendo:

$$S_t = L_v / L_e$$

- Constante de estabilidad del río

Schumm [25] formuló como constante de estabilidad de un río, al valor inverso de la densidad de drenaje:

$$C = A / \sum L_u \qquad C = 1 / D$$

Desde el punto de vista físico, esta variable representa la superficie de la cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Por lo cual, también puede considerarse, como medida de la erodabilidad de la misma. Así es que tanto regiones con suelo rocoso altamente resistente, o con suelos muy permeables que implican una elevada capacidad de infiltración, como regiones con densa cobertura vegetal, presentan altos valores de la constante de estabilidad y bajos de densidad de drenaje. Por el contrario, bajos registros de constante de estabilidad, o una elevada densidad de drenaje, es característica de cuencas con presencia de rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

RESULTADOS

Características físicas de la cuenca del Río Tecka- Gualjaina
Análisis de la morfometría fluvial

La respuesta de cada cuenca desde el punto de vista hidrológico es única y las interrelaciones entre la estructura de la red de drenaje y los procesos hidrológicos son características particulares de cada una y por ello se describen a continuación las propias a la cuenca del Río Tecka-Gualjaina cuyo tributario más importante es el Arroyo Lepá y en segundo término el Arroyo Pescado.

Dentro de las variables independientes de medición directa, las variables físicas que se calcularon para determinar las dimensiones de la cuenca son el área la cual arrojó un valor de 5.318 km^2 y el perímetro, con un resultado de 651 km; ambos valores definen una cuenca de tamaño grande [26]. El conocimiento del área de drenaje es indispensable en el análisis hidrológico porque en función de ella se obtienen los aforos y la relación entre precipitación y caudal. El perímetro no brinda por sí solo información acerca del tamaño de la cuenca, pero es útil para comparar cuencas de igual superficie. Esta última variable está relacionada con la litología y la edad de la cuenca. También se calculó el relieve disponible, siendo de 1.736,7 m. En cuanto a la longitud de la cuenca de drenaje y la longitud del Río, el criterio de medición utilizado para calcular la longitud de la cuenca de drenaje corresponde al empleado en los análisis hidrológicos el cual considera la totalidad del recorrido del curso principal incluyendo la sinuosidad del mismo [10]. La longitud del curso principal del Río Tecka-Gualjaina es de 206 km. La longitud total de los cursos se calculó y ordenó de acuerdo con la jerarquización propuesta por Horton (ver Tabla 3 y Figura 2).

Como variables dependientes de medición indirecta se obtuvieron: la pendiente media de la cuenca (P_{me}), el factor de forma (R_f), la relación de elongación (R_e), la amplitud de la cuenca (W), el coeficiente de compacidad (Kc). Para el cálculo de las variables dependientes se emplean datos obtenidos por las variables de medición directa. La pendiente media de la cuenca es de 2,12 % lo que da idea de un relieve bastante plano. Sin embargo, cabe aclarar, la presencia de importantes relieves positivos que se destacan a largo del perímetro de toda la cuenca. Este parámetro es de gran importancia porque indica la velocidad media de la escorrentía, su poder de arrastre y el poder de erosión sobre la cuenca.

Tabla 3. Variables morfométricas de la cuenca del Río Tecka-Gualjaina.

VARIABLES MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO TECKA-GUALJAINA							
VARIABLES	**Órden de los cursos**						**TOTAL**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	
Número de cauces	385	108	28	9	5	1	536
De longitud de los cauces							
Parámetros							
Longitud de los cursos de orden u (Lu)	1003,96	499,23	298,93	150,29	54,58	146,23	2153,2 km
Longitud media de los cursos de orden u (Lu)	2,6	4,6	3,2	16,7	10,9	146,23	4 km
Longitud del cauce principal (L_b)							206 km
Índices							
Razón de longitud (Rl)		1,8	0,7	5,2	0,7	13,4	21,8
Índice de sinuosidad							1,54
Topológica							
Razón de bifurcación	3,56	3,85	3,11	1,8	5		3,5
De intensidad fluvial							
Densidad de drenaje (Dd)							0,40 km/km^2
Índice de frecuencia (Fd)							0,1 cauce/km^2
Coeficiente de torrencialidad (T)							0,1
Coeficiente de almacenamiento ($_ρ$)							6,2
Tiempo de concentración (Tc)							4 h 15´
Del relieve							
Área							5318 km^2
Perímetro							651 km
Factor de forma							0,13
Radio de elongación							0,39
Índice de compacidad							2,5
Coeficiente de redondez							6,27
Altitud máxima de la cuenca							2210 m
Altitud máxima del cauce principal							1350 m
Altitud mínima de la cuenca							450 m
Altitud mínima del cauce principal							450 m
Altitud media de la cuenca							1132 m
Amplitud de la cuenca							25,85 km
Desnivel de la cuenca (Relieve disponible)							1760 m
Desnivel del cauce principal							900 m
Pendiente media de la cuenca							2,12%
Pendiente media del cauce principal							0,46%

Para determinar la elongación de la cuenca se consideraron el factor de forma y la razón de elongación obteniéndose un R_f de 0,13 y un R_e de 0,39. Ambos valores inferiores a 1 están indicando que la cuenca de drenaje es de forma alargada y muy alargada por el bajo valor de R_f. Una cuenca con un R_f bajo está menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma. También se obtuvo una amplitud de 25,82 km, que según Jardí [10] no indicaría una marcada elongación de la cuenca sino un poco más ancha, dado a que el valor obtenido no es tan bajo. Al observar la silueta de la cuenca se destaca un sector notablemente más ancho en la cuenca baja respecto del resto de la cuenca siendo tal vez esta característica la que refleje el valor de amplitud. No obstante, hay que destacar también su importante extensión latitudinal la que sí quedaría reflejada en los valores de R_f y R_e. Queda así demostrado que no siempre bajos valores de W coincidirían con bajos valores de Rf y Re para caracterizar una cuenca alargada, sino que las diferencias que aquí se encuentran dan cuenta de una cuenca con sectores más anchos y otros más alargados. Los coeficientes de redondez (K) y de compacidad o Gravelius (Kc), también indican una cuenca de forma alargada con valores de 6.27 y 2.5 respectivamente. La forma tan peculiar de la cuenca hace que los valores calculados no reflejen claramente sus condiciones reales sino que marcan una idea generalizada de la condición de la misma en la cual queden encubiertas las características puntuales.

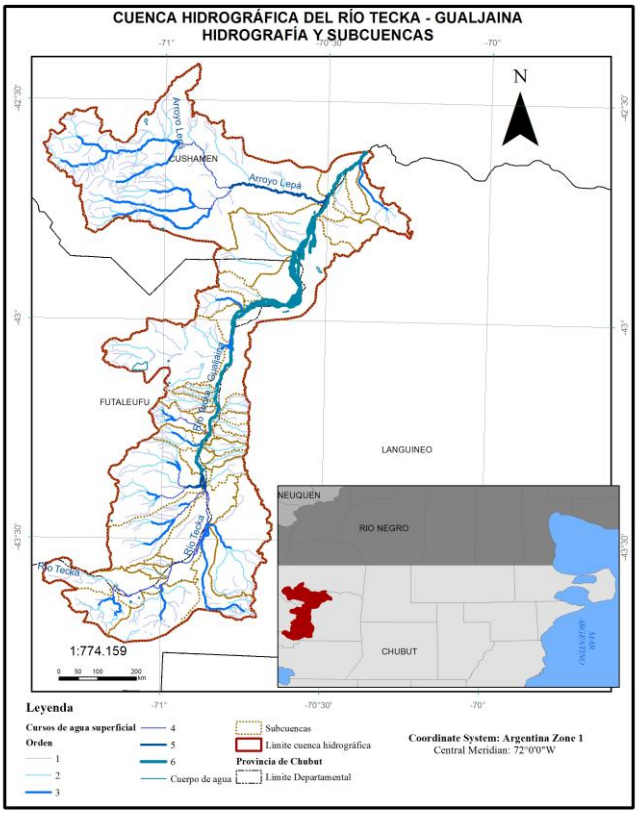


Figura 2. Órden de los cursos de agua de la Cuenca del Río Tecka – Gualjaina, Chubut, Argentina. Fuente: Elaborado sobre metodología propuesta por Horton [9] y modificada por Strahler [13].

Respecto al patrón de drenaje de la cuenca del Río Tecka-Gualjaina, se obtuvo como resultado una cuenca de jerarquía 6, orden asignado al curso principal del Río Tecka-Gualjaina según la metodología descripta. La relación de bifurcación arrojó un valor de 3,5. El dato es coincidente con lo descripto para cuencas naturales en áreas de montaña sin demasiado control estructural [27], sin embargo según estudios realizados en el área por Martínez [28], el drenaje intermitente es en esta zona, controlado por la litología y los cursos presentan valles en "V" con

reducidas planicies aluviales en los tramos inferiores. Asimismo, esta Rb también indica una condición de equilibrio entre el drenaje y la topografía [16] y una similitud climática, litológica y un desarrollo uniforme de la cuenca [15]. Por otra parte, Senciales [27] resalta que altas relaciones de bifurcación estarían indicando la presencia de fuertes pendientes con rápida concentración de escorrentía pero con picos de crecida poco importantes.

La relación de longitud que expresa la proporción de incremento de la longitud media de los cursos de un orden a otro en 2 a 3 veces, es en promedio para la cuenca del Río Tecka-Gualjaina de 4.36. Las conclusiones respecto al mismo no pueden generalizarse ya cada cuenca tendrá diferentes longitudes medias de los cauces en función de sus características. El índice de sinuosidad para el Río Tecka-Gualjaina es de 1,54, el mismo refleja la forma del cauce en relación con la longitud del valle, es decir, este índice refleja la relación entre ambas longitudes [23]. El valor estaría indicando un cauce con características meandrosas. La pendiente media del cauce es de 0,46% lo que representa un relieve llano (ver Tabla 2).

La densidad de drenaje con un valor de 0,40 km/km^2 denota una cuenca mal drenada, es otra de las propiedades relevantes de una cuenca ya que controla la eficiencia del drenaje [29] y refleja el estado erosivo de la cuenca [27]. Dado que los factores que controlan este parámetro son la litología del sustrato, la permeabilidad del suelo y capacidad de infiltración y la cobertura vegetal y el tipo, para la cuenca del Río Tecka-Gualjaina, el resultado da cuenta de las características que presenta la misma. Los materiales geológicos predominantes en la cuenca son duros y resistentes y por ende tienden a originar bajos valores de densidad de drenaje debido a que es difícil la erosión fluvial. A ello se suma las características propias de los suelos (ver Figura 2) y la escasa cobertura vegetal en esta área. La baja densidad de drenaje se asocia con una textura de drenaje gruesa, sin embargo, dentro del espacio de la cuenca se pueden distinguir diferentes áreas con texturas de drenaje que varían desde el tipo gruesa en la cuenca media y baja a más fina en la cuenca alta.

El coeficiente de almacenamiento (6,2) está reflejando que el agua no tiende a ser almacenada en forma subterránea sino que tiende al escurrimiento y en consecuencia a incrementar la erosión, principalmente en aquellos lugares donde los materiales del sustrato y las condiciones del suelo lo permita, llegando así más rápidamente al caudal de pico en su desembocadura. Si bien el número de cauces de orden 1 es elevado, el coeficiente de torrencialidad (0,1) no refleja esta cantidad ya que su bajo valor también estaría indicando una baja erodabilidad de la cuenca como así también la frecuencia de drenaje 0,1 cauce/km^2. Por otra parte, el tiempo de concentración es de 4hs 15´, teniendo en cuenta la forma alargada de la cuenca y la superficie, este tiempo resulta corto ya que el resultado podría estar asociado a cuencas más redondeadas. No obstante debe ser precisamente considerado dada la rapidez que representa la escorrentía en la cuenca.

CONCLUSIONES

El Río Tecka – Gualjaina desarrolla una cuenca de tamaño grande y alargada con presencia de importantes relieves positivos en su contorno, relativamente lobulado. La pendiente media del río supone un relieve plano, sin embargo, las características de su relieve desarrollan condiciones que contribuirían a incrementar el flujo de la corriente frente a la ocurrencia de intensas precipitaciones y fuertes avenidas. No obstante, la pendiente media de la cuenca determina un bajo poder de arrastre y erosión sobre la misma. A ello se le suma, que las características de los materiales geológicos predominantes son duros y resistentes, lo que a su vez determina la baja densidad de drenaje dando como resultado una textura de drenaje gruesa en la cuenca media.

El cauce se caracteriza por el desarrollo de meandros, principalmente en la parte inferior de la cuenca media y en la cuenca baja y el coeficiente de almacenamiento, refleja que el agua tiende al escurrimiento y por ende a incrementar la erosión, donde las condiciones del suelo lo permitan, llegando así más rápidamente al caudal de pico en su desembocadura. El corto tiempo de concentración, de tan solo 4hs 15´, debe ser precisamente considerado dado que representa la rápida escorrentía en la cuenca, es una de las variables fundamentales a tener en cuenta en la gestión de los recursos hídricos.

La caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca del Río Tecka-Gualjaina brinda un conocimiento fundamental de este espacio, el cual contribuirá para la gestión del recurso hídrico, tanto para su aprovechamiento como para mejorar su manejo y conservación en un lugar donde este recurso es escaso. Los resultados forman parte de un estudio integral de la cuenca que tiene como fin realizar un manejo sustentable de este espacio geográfico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de ANCyT a través del proyecto de ANCyT PICT-2011 N°1730.

REFERENCIAS

[1] IGM (Instituto Geográfico Militar). Cartas topográficas 1:100.000, 1980-1981.
[2] M. Torrero y P. Noseda. Balance Hídrico en la Cuenca del Río Gualjaina, Argentina. RALDA, 2010
[3] A.M. Beeskow, H.F. Del Valle y C.M. Rostagno. Los Sistemas Fisiográficos de la Región Árida y Semiárida de la Pcia. de Chubut. CENPAT-SECYT, Chubut, Argentina, 1987.
[4] INTA. Atlas de Suelos de la Rep. Arg. Publicación en CD. Fundación ArgenINTA y Aeroterra S.A. Bs. As, 1995.
[5] INTA. II Áreas Agroecológicas de Chubut. Estación Experimental Chubut, 2002. http://www.inta.gov.ar/Chubut/info/documentos/varios/area_ecol.htm - Consulado el día 23/03/2010.
[6] ESRI. ArcGis 9.3.1.
[7] R. Heras. Recursos hidráulicos. Síntesis, metodología y normas. Cooperativa de publicaciones del Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid (1983), 380 p.
[8] R.E. Horton. Drainage basin characteristics. Transations of the American Geophysical Union 13 (1932), 522-541.
[9] R. Horton. Erosional development of streams and their drainage basins. Hidrophysical approach to quantitative morphology. Geol. Soc. Amer. Bull 56. Cap. 3 (1945), 275-370.
[10] M. Jardí. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. Revista de Geografía. Volumen XIX. Departamento de Geografía de la Universidad de Barcelona (1985), 41-68.
[11] J. Llamas. Hidrología General. Principios y Aplicaciones, Azehu, Bilbao (1993), 635 p.
[12] H. Gravelius. Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I., 1985. Morphometry of Drainage Bassins. Developments in water science, 20. Elsevier, Amsterdam (1914), 238 pp. ISBN 0-444-99587-0.
[13] A.N. Strahler. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V. T., Handbook of applied hydrology, McGraw-Hill, N. York (1964), 4-39 a 4-76.
[14] M.J. Cuesta. Dinámica erosiva en los paisajes de la cuenca del río Guadajoz (Córdoba y Jalén). Córdoba, Servicios de Publicaciones de la Universidad de Córdova (2001), 226 p.
[15] A.N. Strahler y A. Strahler. Geografía Física. Omega. Barcelona (1987), 629 p.
[16] M.J. Woldenberg. Spatial order in fluvial systems: Horton´s laws derived from mixed hexagonal hierarchies of drainage basin are áreas. Geological Society of America Bulletin 80, 1969.
[17] K.G. Smith. Standrs of grading texture of erosional topography. American Journal of Science (1950), 655-668.
[18] A. Benítez. Captación de aguas subterráneas; nuevos métodos de prospección y cálculo de caudales. Dossat. Madrid (1972), 74-83.

[19] J. Busnelli y L.R. Horta. Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial, Tucumán. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 71 (1) (2014), 11-20.
[20] Z.P. Kirpich. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. Civil Engineering, Vol. 10 Nº6 (1940), 362 p.
[21] G.A. Hathaway. Design of Drainage Facilities. Transactions of the American Society of Civil Engineer, 110 (1945), 697-730.
[22] W.S. Kerby. Time of concentration of overland flow. Civil Engineering, 60 (1959), 174 p.
[23] S.A. Schumm. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. Bulletin of Geological Society of America, 74 Nº 9, 1963.
[24] J de Pedraza Gilsanz. Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones. Ed. Rueda. Madrid (1996), 414 p.
[25] S. Schumm. The fluvial system. A Wiley-interscience Publication. John Wiley and Sons, Inc. New York (1956), 338 p.
[26] A. Campos. Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. San Luis Potosí, México (1992), 22-23.
[27] J.M. Senciales Gonzáles. Redes fluviales. Metodología de análisis. Estudios y Ensayos, 34. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga (1999), 337 p.
[28] O. Martínez. Geomorfología y Geología del Cuaternario en el noroeste de la Provincia de Chubut. II Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología. San Miguel de Tucumán, Argentina. Actas (2003), 301-312.
[29] J.A.A. Jones. Global hydrology: processes, resources and environmental management. London, Addison-Wesley (1997), 399 p.

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LOS ÁNGELES DPTO. CAPAYÁN. CATAMARCA. R.A.

Varela N.[a], Plaza J.[a], Vilches F.[a], Tálamo E.[a,b], Sánchez M.[a], Palomeque L.[a], Fuentes S.[a]

[a]Departamento de Geología, FTyCA, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA
[b]Consultora Hidrogeológica, CONHIDRO S.R.L.

e-mail: nvarelan@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación y desarrollo denominado "Estudio de la subcuenca del río Los Ángeles para el manejo y protección del recurso hídrico en la gestión ambiental de cuencas. Dpto. Capayán. Catamarca. R.A.", actualmente en ejecución (período 2014-2018). La subcuenca del río Los Ángeles forma parte de la cuenca principal del río del Valle, al Sudeste de la provincia de Catamarca.
El objetivo del presente estudio es obtener y analizar los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Los Ángeles, para establecer las bases hidrológicas del análisis ambiental, de planificación y ordenamiento de la misma.
Para lo cual se determinó y analizó el comportamiento de la red de drenaje y la evolución topográfica e hipsométrica asociada a la morfodinámica de la subcuenca. Se confeccionaron mapas a escala 1:250000 para el cálculo de los parámetros de forma, relieve y características de la red de drenaje.
A partir de los datos obtenidos, se realizó una integración conceptual que permitió concluir que las condiciones de evolución de la subcuenca están relacionadas con las respuestas morfodinámicas e hidrológicas, representadas y controladas por las características de la misma y de su red de drenaje.

Palabras Clave: morfometría, subcuenca, río Los Ángeles.

INTRODUCCIÓN

La subcuenca del río Los Ángeles se encuentra inmersa en la gran cuenca del río del Valle de la provincia de Catamarca. Se trata de una pequeña cuenca intramontana limitada por las altas cumbres del cordón del Ambato y por las serranías de Los Ángeles. El colector principal es el río Los Ángeles que atraviesa la cuenca de Norte a Sur entre las serranías mencionadas. Este curso, de aguas permanentes, representa el principal recurso hídrico para el desarrollo de las poblaciones emplazadas en sus márgenes. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas 28º 22´46" y 28º 34´27" de latitud Sur, y 65° 54' 53" - 66° 03' 11" de longitud Oeste, y a una altitud media de 2400 msnm. La principal vía de acceso es la Ruta Provincial N° 38 hasta la población de Miraflores en el departamento Capayán, donde empalma con la Ruta Provincial N°5, y tras atravesar un estrecho camino de cornisa (12 km) se accede a el área de estudio, ver Figura 1.

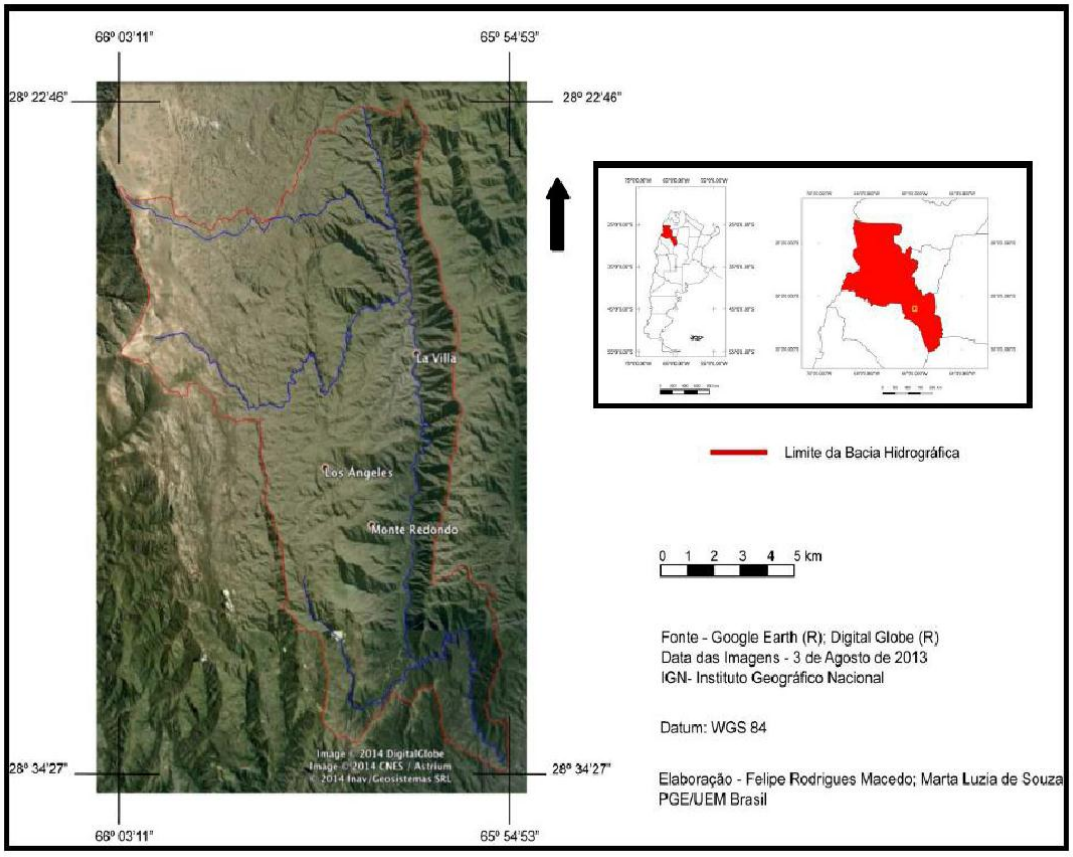


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Objetivo general

Obtener y analizar los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Los Ángeles, para establecer las bases hidrológicas del análisis ambiental, de planificación y ordenamiento de la misma.

Objetivos específicos

- Generar cartografía base.
- Determinar parámetros asociados a la forma de la subcuenca.
- Determinar parámetros relativos al relieve.
- Determinar parámetros relativos al drenaje.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo del presente trabajo constó de las siguientes etapas y métodos:

- Mediante interpretación del mapa topográfico se obtuvieron los límites topográficos de la cuenca y la red hidrológica, dichos mapas fueron obtenidos a partir de MDE, generados con el software Global Mapper v 16.1.
- Reconocimiento en terreno de la geología e hidrografía determinada en las imágenes satelitales y cartas geológicas consultadas.

- Delimitación de la cuenca hidrográfica y mapeo de los cursos de agua sobre mapa topográfico digital ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model). La interpretación fue digitalizada y rasterizada en el programa ILWIS Academic 3.3
- Confección de cartografía digital a escala 1:250000 haciendo uso del sofware Global Mapper v16.1
- Determinación de parámetros morfométricos con el sofware SIG ILWIS OPEN, mientras que los datos necesarios para los índices fueron extraídos de tablas generadas por ILWIS OPEN a partir de los mapas rasterizados de topografía (del modelo digital del terreno o MDT).

RESULTADOS

GEOLOGÍA

El área de estudio se enmarca dentro de la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas Occidentales, caracterizada por presentar un basamento cristalino constituido por metamorfitas y migmatitas, con una edad de metamorfismo ordovícica que alojan una serie de granitoides calcoalcalinos asociados a diferentes ciclos deformacionales. Este basamento se encuentra en partes cubierto por sedimentitas continentales de edades neopaleozoicas, que registran frecuentes niveles piroclásticos procedentes de la Cordillera Frontal. Tectónicamente, esta provincia geológica está constituida por un sistema de montañas en bloques limitados por fallas inversas de alcance regional, de alto ángulo y rumbo general Norte-Sur (Ramos, 1999) [1].

Estratigrafía Local

La estratigrafía que se detalla a continuación está basada en la descripción geológica de la Hoja 14d, San Fernando del Valle de Catamarca (Blasco *et. al*., 1994) [2], relacionando la misma con las interpretaciones realizadas por Gonzalez Bonorino (1978) [3] en la Hoja 14f San Fernando del Valle de Catamarca y por Nullo (1981) [4] en la Hoja 15f Huillapima, ver Figura 2.

PRECÁMBRICO-PALEOZOICO INFERIOR

Basamento Metamórfico

Formación La Cébila (1): Esquistos bandeados, micacitas cuarcíferas y felsíticas calcosilicáticas

Formación El Portezuelo (6): Gneises bandeados, migmatitas y esquistos inyectados

Plutonitas Postectónicas

Granitos biotíticos-muscovíticos (11): Cuerpos netamente intrusivos de contorno subelíptico a subcircular y diámetros de 1 a 2 km hasta dimensiones tipo stock, emplazados discordantemente en rocas esquistosas y gnéisicas.

Pegmatitas (12): Cuerpos pegmatíticos tabulares o lenticulares se encuentran intruyendo a las metamorfitas, y en menor medida, a las rocas plutónicas, a las que se asocian como fase póstuma de la intrusión granítica.

CUATERNARIO

Pleistoceno

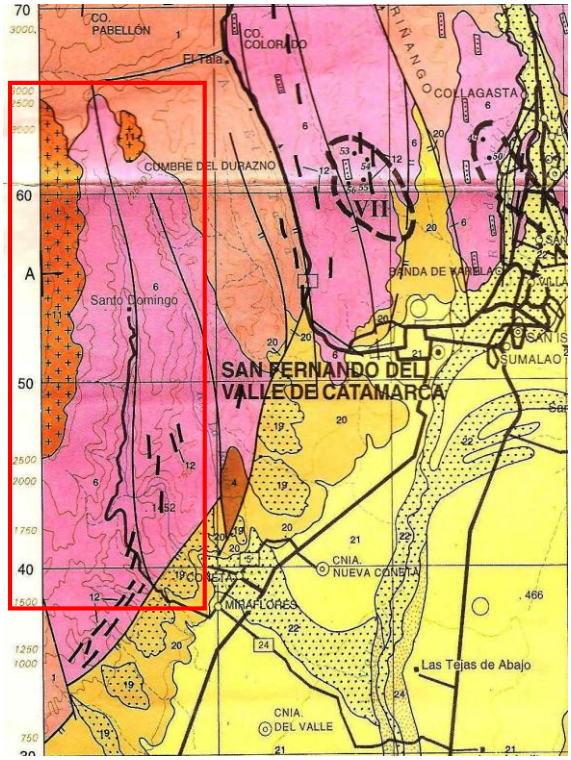
Formación Concepción (19): Fanglomerados con rodados de grava mediana a gruesa, compuestos por esquistos, migmatitas y rocas graníticas.

Holoceno

Formación Coneta (20): Litológicamente se trata de limos arenosos, limos e intercalaciones de fanglomerados; la estratificación es caótica y responde a flujos no encauzados.

Depósitos aluviales (22): Los depósitos aluviales se extienden en toda la depresión tectónica del valle de Catamarca. En el área de estudio afloran en el extremo sudoriental a la salida de la cuenca. Litológicamente corresponden a arenas finas a gruesas, gravas y rodados tamaño

bloque. Depósitos de loess se observan en forma discontinua en el área de estudio, no cartografiables a la escala de trabajo, al igual que los depósitos aluviales en el lecho del río Los Ángeles.



REFERENCIAS				
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	22	Depósitos aluviales
			20	Fm Coneta
		Pleistoceno	19	Fm Concepción
CARBONÍFERO INFERIOR A ORDOVÍCICO			12	Pegmatitas
			11	Granitos
ORDOVÍCICO A PRECÁMBRICO SUPERIOR			6	Fm El Portezuelo
			1	Fm La Cébila

Figura 2. Geología del área de estudio. Fuente: Hoja Geológica 2966-II San Fernando del Valle de Catamarca (Esc. 1:250.000), 1994.

Estructura

La estructura del área de estudio es relativamente simple, se corresponde con el esquema tectónico regional, que se caracteriza por presentar lineamientos de rumbo general meridional, que definen bloques serranos y valles estructurales. La quebrada de Los Ángeles responde a una fractura de rumbo meridional que nace a la latitud del Co. Crestón, al NW del mismo y se extiende hacia el Sur por aproximadamente 25 km. La marcada profundidad del valle se debe en parte al rechazo de falla pero fundamentalmente a la erosión fluvial. La quebrada acusa un desnivel de más de 1.000 m entre la cabecera principal y su nivel de base.

Geomorfología

La morfología de la zona de estudio se corresponde con las características geomorfológicas generales de la región, que se definen por un neto control estructural dado por lineamientos de rumbo meridional predominante. Los cordones serranos se corresponden con bloques de basamento y los valles longitudinales con depresiones tectónicas.

El valle intermontano longitudinal de Los Ángeles no escapa a estas características y responde a un control estructural dado por un lineamiento de rumbo N-S. El cordón cumbre de Los Ángeles corresponde a un bloque volcado al Este, muestra una cresta roma y regular.

En contraste, la vertiente oriental del Ambato se extiende hacia el Este más suavemente, con una línea de cumbres pareja pero con un relieve rugoso por el material granítico que las constituye, las formas se suavizan laderas abajo debido al cambio litológico (metamorfitas).

Siendo la estructura tectónica sencilla también lo es la morfología. Los valles longitudinales descienden junto con las sierras interiores, hasta que finalmente coalescen, por desaparición de éstas en la amplia depresión del río del Valle.

Hidrografía

La subcuenca del río Los Ángeles responde al esquema regional de desarrollo de red de drenaje controlada por la estructura. En efecto, el colector principal, el río Los Ángeles, es un río longitudinal que sigue con rumbo submeridional la estructura del valle tectónico, dicho valle se encuentra limitado al Este por el cordón Cumbres de Los Ángeles, y al Oeste por el cordón principal de las sierras de Ambato.

El curso principal tiene su cabecera en el extremo noreste de la subcuenca, nace con el nombre de arroyo de la Loma y aguas abajo cambia por el de río Los Ángeles dando nombre a la subcuenca.

Los afluentes principales tienen sus nacientes en las altas cumbres del Ambato, ya que este cordón actúa como barrera natural para la captación de humedad por lo que las precipitaciones son más frecuentes y constituyen un aporte permanente de caudal, sumado a la mayor longitud de sus cauces.

Mientras que las quebradas que bajan del cordón de Los Ángeles, dado su corto recorrido no presentan un flujo permanente. No obstante muestran una gran pendiente y constituyen un potencial peligro ante precipitaciones torrenciales. En el extremo austral del valle, a la altura del barrio Los Pinos, recibe el aporte del arroyo Los Pinos, y en respuesta a un cambio estructural, cambia su rumbo hacia el E-NE por un corto trayecto hasta retomar nuevamente el rumbo general.

El caudal de esta subcuenca es empleado para riego y uso doméstico. A la salida de la misma se realiza la captación del fluido remanente para aprovisionamiento de la población de Miraflores.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

- ***PARÁMETROS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA***

Área, perímetro, longitud y ancho

El área de una cuenca es un parámetro determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como el volumen del agua que ingresa por precipitación y de la magnitud de los caudales entre otros. Se define como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural, corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas.

El perímetro (P) es un importante parámetro, ya que en relación con el área de una cuenca indica la forma de ésta. Su valor está dado por la longitud de la línea divisoria de aguas, medida sobre un plano horizontal. La longitud (L) de la cuenca queda definida por la línea recta imaginaria paralela al cauce principal del río, medida desde la desembocadura (estación de aforo), hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río corta la línea perimetral.

El ancho (W) de una cuenca se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la misma (L), ver Ec. (1).

$$W = A/L \qquad (1)$$

Factor de forma

El factor de forma, definido por Horton, indica cómo se manifiesta o regula el escurrimiento superficial. Su valor está dado por la relación entre el área (A) y el cuadrado de la longitud (L) de la cuenca, ver Ec. (2).

$$Kf = A/L^2 \qquad (2)$$

Un factor igual a la unidad representa una cuenca de forma circular, un valor superior a la unidad indica un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. Factores inferiores a

la unidad representan una cuenca alargada, menos sujeta a crecientes que una de igual área y con mayor factor de forma.

Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad (Kc), propuesto por Gravelius, compara el perímetro de la cuenca (P) con el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca (Pc), ver Ec. (3).

$$Kc = P/Pc = 0.28P/\sqrt{A} \quad \textbf{(3)}$$

El grado de aproximación de este coeficiente a la unidad, indica la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, es decir mayor concentración de agua. Las características de la cuenca de acuerdo al valor del coeficiente (Kc) se definen como: redonda (1 a 1.25), oval redonda (1.25 a 150), oval oblonga (1.50 a 1.75), y oblonga rectangular (>1.75).

Relación de elongación

La relación de elongación (Re) propuesta por S. A. Schumm, se define como el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo de igual área que la cuenca, y la longitud de la misma (L). Valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieves bajos, valores inferiores a 0.8 están asociados a fuertes relieves y pendientes pronunciadas.

$$Re = 1.1284\ \sqrt{A}/L \quad \textbf{(4)}$$

Los valores determinados sobre la cartografía generada de los parámetros asociados a la forma de la cuenca fueron los siguientes: área, 143 Km^2; perímetro, 75 Km; longitud de la cuenca 22 Km, ancho 6.5 Km; Kf = 029, valor que define a la cuenca como alargada; Kc = 1.76 valor que define a la cuenca como oblonga rectangular; Re = 0.61, valor que indica fuertes relieves y pendientes pronunciadas, ver Figura 3.

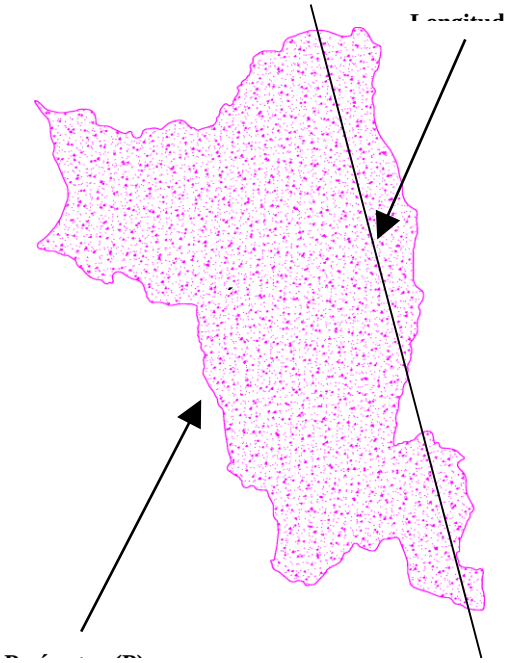


Figura 3. Croquis de la subcuenca del río Los Ángeles.

- ***PARÁMETROS RELATIVOS AL RELIEVE***

Relieve y altitud

Son factores relevantes dado que tienen mayor influencia sobre la respuesta hidrológica de la cuenca, que la forma misma de la cuenca, tales como relación de infiltración, escurrimiento superficial y la contribución del agua subterránea a l flujo de los cauces. A mayor pendiente mayor velocidad en las corrientes de agua y menor tiempo de concentración en la cuenca. Entre los elementos más representativos de una cuenca derivados de la elevación se mencionan: la cota mayor de la cuenca (C_M) dado por el punto de mayo altitud sobre la divisoria de aguas, la cota menor (C_m) punto donde la cuenca entrega sus aguas a un cauce mayor, la elevación media y la distribución de superficies por tramos de altitud.

Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación gráfica de la distribución de la cuenca en km^2 o en porcentaje (%) por tramos de altura. En el histograma correspondiente a la zona en estudio, se observa que las altitudes comprendidas entre los 2000 y 2500 msnm, son las de mayor frecuencia, y el tramo entre 500 y 1000 msnm representan la menor distribución en % de superficie, ver Figura 4.

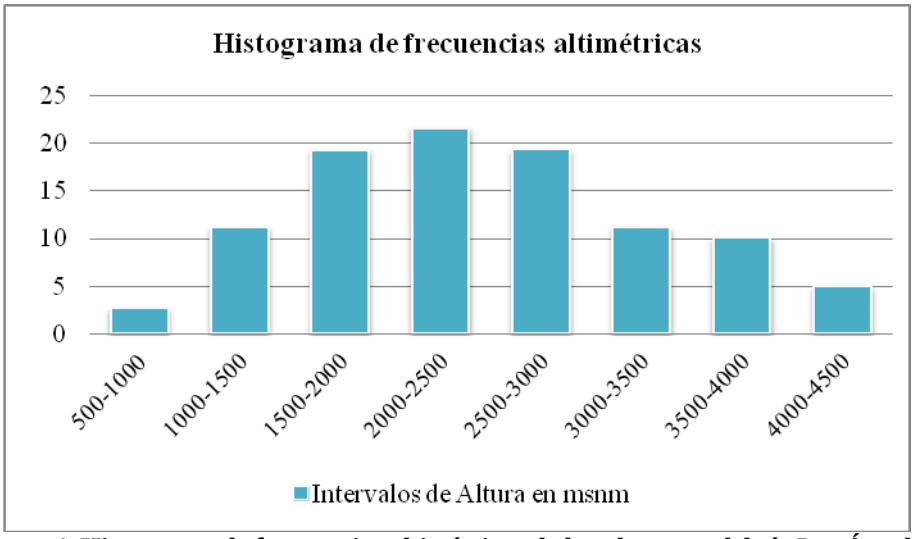


Figura 4. Histograma de frecuencias altimétricas de la subcuenca del río Los Ángeles.

Curva hipsométrica

Esta curva proporciona información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes. En el eje de las ordenadas se representan las distintas cotas de altura de la cuenca, y en las abscisas la superficie de la cuenca que se halla por encima de esas cotas, en Km^2 o en porcentaje (%). A partir de esta curva también es posible obtener el valor de la altitud media, parámetro de especial interés particularmente en regiones montañosas ya que permite tener una idea de las características climatológicas en base a parámetros regionales. La cota máxima de la subcuenca en estudio es de 4243 msnm (C_M), la cota mínima (C_m) es de 620 msnm, y la altitud media es de 2400 msnm, este último dato corresponde a la abscisa 50 % del área en la curva hipsométrica, ver Figura 5.

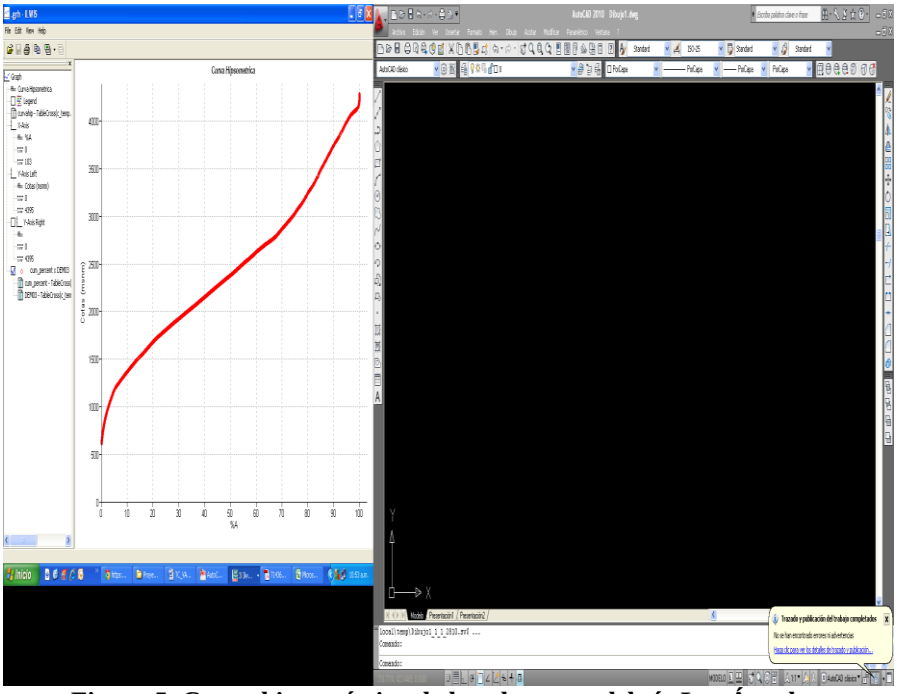


Figura 5. Curva hipsométrica de la subcuenca del río Los Ángeles.

- ***PARÁMETROS RELATIVOS AL DRENAJE***

Orden de corriente

El orden de corriente (ω) es un valor que indica el grado de bifurcación o ramificación de una cuenca. En el presente trabajo se aplicó el método de Horton que se fundamenta en los siguientes criterios: se consideran corrientes de primer orden, a quellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden i+1. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor resulta una corriente que conserva el mayor orden. Por lo tanto el orden de corriente es un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca. El número de orden determinado en la cuenca en estudio es ω = 5, ver Figura 6.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (D) es un parámetro que refleja la dinámica de una cuenca. Se define como el cociente entre la longitud total de la red de drenaje (L_T) y el área de la cuenca (A) se expresa en Km/Km^2, ver Ec. (6). En general, las cuencas de escasa densidad de drenaje se encuentran en áreas de elevada permeabilidad o geología resistente, bajo cubierta vegetativa densa y sobre relieves suaves; por el contrario, cuando la densidad es elevada, la permeabilidad es baja o la geología menos resistente, la vegetación escasa y relieve accidentado.

$$D = L_T/A \qquad (6)$$

Frecuencia de corriente

La frecuencia de drenaje (F) es un parámetro similar al anterior pero que define el número de segmentos de corriente por unidad de área, ver Ec. (7), donde N_T es la suma de todos los segmentos de canal que forman la red hidrográfica de la cuenca.

$$F = N_T/A \quad (7)$$

La densidad de drenaje y la frecuencia, miden propiedades diferentes, la primera da una idea de la abundancia de agua en la cuenca y la segunda de la repartición de la misma en la cuenca. Ambas se relacionan mediante un factor de proporcionalidad, ver Ec. (8).

$$F = 0.694\ (D)^2 \quad (8)$$

Diseño de la red de drenaje

La combinación de los efectos del clima, la geología y la topografía de una cuenca originanun modelo erosional que caracteriza la red de drenaje. La red de drenaje de la subcuenca del río Los Ángeles define un patrón dendrítico, caracterizado por una ramificación arborescente donde los tributarios se unen al cauce principal formando ángulos agudos, este patrón se ve diferenciado en la vertiente oriental de la cuenca donde se manifiesta un tendencia al diseño a subparalelo, ver Figura (6).

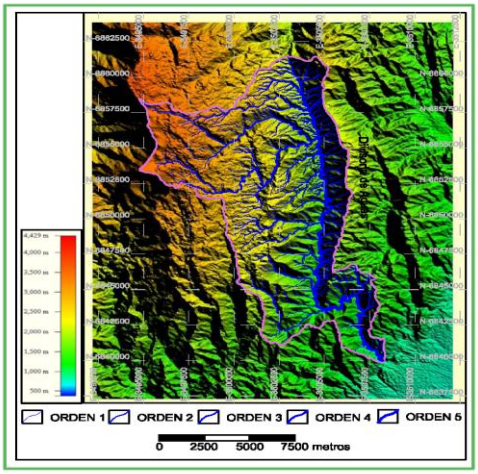


Figura 6. Mapa de la subcuenca con orden de drenaje, relieve y diseño de drenaje. Esc. 1:250.000

CONCLUSIONES

La subcuenca del río Los Ángeles, se define a partir de los parámetros morfométricos determinados, como una cuenca pequeña, de forma alargada, oblonga rectangular, con un marcado relieve y pendientes pronunciadas. En relación a los parámetros de relieve y altitud se observa a partir del histograma de frecuencias que el tramo altitudinal de 2000 a 2500 msnm representa la mayor distribución en % de superficie, siendo el de menor distribución el tramo altitudinal comprendido entre 500 y 1000 msnm. El punto de mayor altitud de la cuenca es de 4243 msnm (C_M) y el de menor altitud es de 620 msnm (Cm) dado por el punto de aforo, y la altitud media obtenida a partir de la curva hipsométrica es de 2400 msnm.
Los elevados valores de densidad de drenaje y frecuencia de drenaje obtenidos corresponden a áreas con alta permeabilidad, geología resistente, vegetación escasa y relieve accidentado.
El análisis de las características definidas permiten concluir que la concentración de las aguas precipitadas se ve favorecida por las pendientes de la ladera occidental de la subcuenca. Las quebradas de la ladera oriental tienen un corto recorrido pero una marcada pendiente, que si bien no constituyen cursos permanentes representan un potencial peligro ante precipitaciones torrenciales.

REFERENCIAS

[1] V. Ramos, *Las Provincias Geológicas del Territorio Argentina.* En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29 (3): 41-69, Buenos Aires, 1999.

[2] G. Blasco, R. Caminos, O. Lapido, A. Lizuaín, H. Martinez, f. Nullo, J. Panza y L. Sacomani, *Hoja Geológica 2966-II San Fernando del Valle de Catamarca, Provincias de Catamarca, Santiago del Estero y Tucumán.* Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 212, Buenos Aires, 1994.

[3] F. Gonzalez Bonorino, *Descripción Geológica de la Hoja 14f, San Fernando del Valle de Catamarca,* Servicio Geológico Nacional, Boletín 160, Buenos Aires, 1978.

[4] F. Nullo, *Descripción Geológica de la Hoja 15f, Huillapima,* Servicio Geológico Nacional, Boletín 178, Buenos Aires, 1981.

[5] J. Llamas, *Hidrología General: principios y aplicaciones,* Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao, 1993.

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS EN CUENCAS ANDINAS: REGIONES HOMOGÉNEAS E INTERVALOS DE CONFIANZA

Alberto I. J. Vich[a,b], Carolina Lauro[a], Sebastián A. Otta[a]

[a]Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA – CONICET), ARGENTINA
[b]Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras (FFyL), Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), ARGENTINA

e-mail: aijvich@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

*El objetivo es determinar la magnitud de las variables de caudal anual y estacional, para diferentes periodos de retorno, obtener un cuantil en sitios sin información y determinar los intervalos de confianza de la función de distribución de frecuencias, a partir del Análisis Regional de Frecuencias basadas en momentos-**L** (**ARF-LM**). Se analizaron 23 sitios de aforos de la región cuyana, desde los 31 ° a 37 ° de latitud sur, sobre la cordillera de Los Andes.*
*Se efectuó un análisis exploratorio de datos (**AED**), la normalidad es rechazada, en promedio, el 54 % de los casos, la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34% de las series analizadas. Se detectaron tendencias crecientes y cambios abruptos se producen en la década del 70.*
Se identificó la región homogénea para cada una de las 5 variables analizadas, mediante pruebas de Discordancia y Heterogeneidad y la adopción de la distribución de mejor ajuste se realizó por medio de la medida $\boldsymbol{Z^{DIST}}$ y $\boldsymbol{PUM_T}$. En todos los casos las funciones de distribución Gumbel o Pearson III, proporcionan un ajuste aceptable.
Se establecieron los límites del error al 90%, se evaluó la incertidumbre de las estimaciones de cuantiles para 12 frecuencias. La incertidumbre se evalúa mediante el error cuadrático medio relativo y desvío relativo medio, en base a procesos de simulación del tipo de Monte Carlo. Los errores promedio, varían entre 9.75 y 5.79%; los desvíos promedios son bajos, entre 0.38 y 0.09%.

Palabras Clave: Los Andes, análisis regional de frecuencias, incertidumbre, límites de error

INTRODUCCIÓN

Globalmente Argentina dispone de una oferta hídrica media anual de 23.000 m^3 hab^{-1}, pero una distribución muy irregular, ya que numerosas provincias de la región árida y semiárida se ubican muy por debajo del nivel crítico de stress hídrico propuesto por el PNUD. A la variación estacional muy marcada, se le suma una alta variabilidad interanual y grandes desbalances entre la demanda y la oferta natural de agua. También, sufre las consecuencias de la ocurrencia de fenómenos extremos (crecientes y sequias) cada vez más frecuentes en las últimas décadas [1], que en muchos casos es debido a fenómenos climáticos globales o inducidas por la actividad humana [2] [3] [4]. Todo ello, afecta de manera severa las actividades agrícolas, ganaderas, industriales y de la sociedad en general, particularmente en el centro oeste, noroeste argentino. El conocimiento del potencial hídrico superficial de las cuencas cuyanas, particularmente de la provincia de Mendoza, se realiza a partir de la elaboración y evaluación de la información hidrológica disponible, proveniente de la red de estaciones existentes. Tarea sumamente

laboriosa, que solo puede ser realizada con precisión y eficiencia si los antecedentes son suficientemente detallados. Previamente se debe realizar un análisis exploratorio de los datos (**AED**) y verificar la consistencia de las series hidrológicas.

El comportamiento de las series de variables hidrológicas se describe con la ayuda de funciones de distribución de probabilidades, al vincular su magnitud con la frecuencia de ocurrencia o su período de retorno **T** asociado [5], o mejor aún, es estimar la función probabilística completa [6]. Pero, las características del área bajo estudio, su variabilidad temporal y espacial, la influencia de factores externos de variabilidad y la reducida disponibilidad de registros de adecuada extensión, imponen ciertas restricciones en la elección del modelo probabilístico más adecuado.

En consecuencia, el objetivo del presente trabajo es mejorar el conocimiento de la oferta hídrica, evaluar el impacto sobre los recursos hídricos superficiales del cambio climático global en las cuencas cuyanas a partir de la detección de los posibles cambios en las tendencias de largo plazo y cambios abruptos. Además se pretende determinar la magnitud de las variables de caudal (anual $\mathbf{Q_A}$, de verano $\mathbf{Q_V}$, de otoño $\mathbf{Q_O}$, de invierno $\mathbf{Q_I}$ y de primavera $\mathbf{Q_P}$, para diferentes períodos de retorno, especialmente a niveles mucho mayores que los observados en el pasado y obtener un cuantil en sitios sin información, a partir de la aplicación de la metodología de Análisis Regional de Frecuencias basadas en la estadística de momentos **L** (**ARF-LM**). Dicho procedimiento permite superar las restricciones citadas y aumentar la confiabilidad en la estimación de las probabilidades de ocurrencia de las variables. Es considerado como una de las mejores alternativas para abordar las restricciones mencionadas.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de estudio: clima y características físicas

Los Andes regulan el paso de masas de aire que provienen de los centros de alta presión del océano Atlántico y el océano Pacifico y configuran el régimen fluvial de los ríos que se originan en sus laderas [7]. La zona bajo estudio se corresponde con las cuencas que se localizan en el centro oeste de Argentina, comprendido entre los 28° y 33° S. Esta región es drenada por el extenso sistema hidrográfico del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú o Curacó. De norte a sur presenta una extensión aproximada de 1000 km de longitud de tierras secas, donde se desarrolla un sistema hidrográfico complejo, con afluentes permanentes y temporarios, integrado por los ríos Vinchina-Bermejo y su principal afluente el río Jáchal, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel, colectados por el río Desaguadero-Salado-Chadileuvú. Sus nacientes se localizan en la Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera.

El agua de los afluentes provienen en su casi totalidad de la fusión nívea y de los glaciares existentes en su cuenca y en muy menor medida de la lluvia y al abandonar las últimas elevaciones del oeste, se convierten en ríos alóctonos. Todos los ríos han sido usados en la producción de energía, en el riego de numerosos oasis y abastecimiento a poblaciones, que al perder su caudal presentan una red de drenaje muy desdibujada y transforman al colector en una corriente, con largos tramos de cauce seco y lagunas intercaladas, que ocasionalmente mantiene su conexión con el río Colorado.

El Colorado es un río alóctono, formado por la unión de los ríos Grande y Barrancas, cuya cuenca posee una extensión aproximada de más de 70.000 km^2. En su curso medio e inferior recibe temporariamente los escasísimos caudales del Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó. Cuando ello ocurre, la cuenca del Desaguadero se hace exorreica y la cuenca del Colorado se amplía a una superficie de 361.620 km^2, la segunda de extensión en el país y la primera de la Patagonia. En ella existe una importante infraestructura hidráulica para usos múltiples, siendo la irrigación el uso más importante. En los oasis se asienta la población y constituyen el espacio de desarrollo de la industria dedicada a la vitivinicultura, conservera y olivícola. En muchos casos se hace un uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

Las precipitaciones presentan fluctuaciones estacionales, anuales y de largo plazo, que responden, entre otros factores, a las variaciones latitudinales en los campos de presión en América del Sur. En los meses de diciembre a febrero, la influencia del océano Atlántico es máxima sobre la vertiente este de Los Andes, desde los 22° a 35° S, mientras que la influencia del océano Pacífico es máxima en el invierno y en alta montaña es mayormente originada por él y se concentra en los meses de mayo a agosto. El invierno en general, es la época de menor precipitación en todas las áreas del llano de la Cuenca.

El *"desarrollo normal del tiempo"* en la región cuyana muestra que al finalizar agosto, existe un período de buen tiempo, con anomalías positivas de la temperatura y de la velocidad del viento, pudiendo soplar viento Norte en el este y viento Zonda en el oeste de ella. A principios de setiembre suele ingresar aire frío asociado a heladas y eventualmente nevadas no solo en la alta montaña sino también ocasionalmente en el llano de la región. En las primeras semanas de octubre se inician las tormentas eléctricas, que se van incrementando a medida que avanza la primavera para alcanzar su mayor frecuencia en enero y febrero; muchas de ellas son acompañadas de caída de granizo. El comportamiento pluviométrico en la mayor parte del territorio de la cuenca, en coincidencia con las áreas de clima seco, presenta máximos estivales y por el contrario las áreas de clima de altura presentan máximos invernales. Hay algunas áreas de Mendoza donde conviven ambos regímenes. El régimen pluviométrico es netamente estival con diferencias en cuanto a la acumulación según estén más al norte y más al oeste.

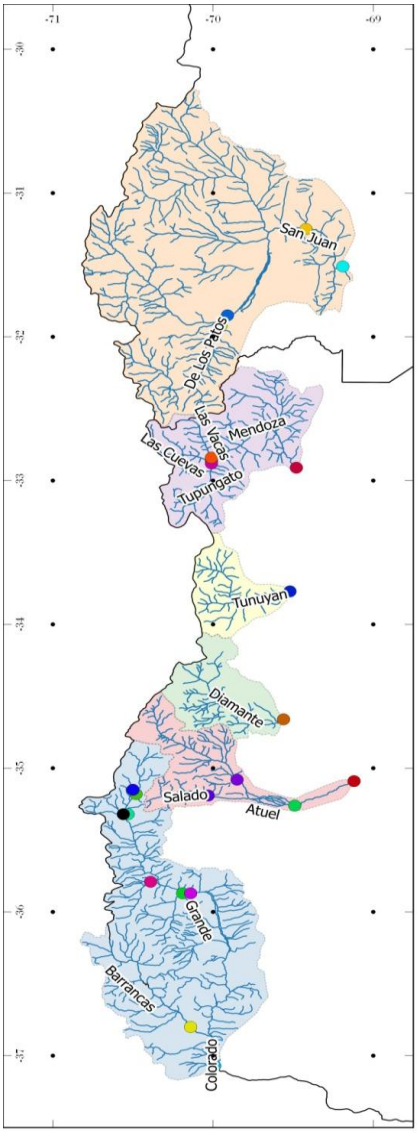


Figura 1: estaciones de aforos

Según la clasificación de Köeppen (1948), en el área se presentan dos tipos del clima: clima seco (**B**) y clima polar (**E**). La mayor parte de las cuencas en estudio están dominadas por la zona climática de tipo **B**. La región oriental con el subtipo seco de estepa (**BS)** y la occidental con la variante seco desértico (**BW**). En la región cordillerana el clima es de tipo polar debido a la altura (**ETH**), incluyéndose zonas de clima polar helado o de hielos eternos (**EF**). El límite entre el clima de tundra de altura **ETH** y el polar helado **EF** está dado por la isoterma de 0°C correspondiente a la temperatura media del mes de enero. En síntesis, la cuenca del río Colorado presenta en la mayor parte de su territorio, un clima seco desértico y estepario en el llano y climas polares fríos de altura, de tundra y de hielos eternos en las áreas cordilleranas por encima de los 3.000 metros sobre el nivel del mar.

Estaciones de aforos

Las estaciones de aforo utilizadas para el desarrollo del presente trabajo fueron 79. En la **Figura 1** se muestran los 23 sitios de aforos para la región de Cuyo. La información de base empleada es el caudal medio diario, proporcionado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. En algunos casos las series fueron extendidas por la adición de caudales mensuales publicados en anuarios hidrológicos. En la **Tabla I** se indican las coordenadas de la estación de aforos, altura de la estación, porcentaje de datos faltantes de caudal diario medio y longitud de los registros de observaciones. El año hidrológico se extiende de julio a junio en los ríos correspondientes a la región cuyana.

Tabla I: Estaciones de aforos

Cuenca	Rio	Estación de aforo	Sigla	Latitud Sur	Longitud Oeste	h	% Datos faltantes
San Juan	San Juan	Km101	SJK1	31º15'09"	69º10'38"	1310	22,26
		Km47,3	SJK4	31º30'59"	68º56'24"	945	0,26
	Los Patos	La Plateada	LPLP	31º51'19"	69º39'38"	1900	9,77
		Alvarez Condarco	LPAC	31º55'13"	69º42'13"	1950	3,59
Mendoza	Vacas	Punta de Vacas	VPV	32º50'49"	69º45'45"	2450	5,36
	Cuevas	Punta de Vacas	CPV	32º51'55"	69º46'05"	2430	6,58
	Tupungato	Punta de Vacas	TPV	32º52'51"	69º46'06"	2450	5,34
	Mendoza	Guido	MEG	32º54'55"	69º14'16"	1550	0,00
Tunuyan	Tunuyan	Valle de Uco	TVU	33º46'35"	69º16'21"	1200	0,70
Diamante	Diamante	La Jaula	DLJ	34º40'06"	69º18'58"	1500	1,26
Atuel	Atuel	El Sosneado	APS	35º05'02"	69º36'11"	1580	2,18
		Loma Negra	ALN	35º15'52"	69º14'55"	1340	0,00
		La Angostura	ALA	35º05'56"	68º52'25"	1200	0,20
	Salado	Cañada Ancha	SCA	35º11'52"	69º46'58"	1700	4,31
Grande	Cobre	Valle Hermoso	CVH	35º09'00"	70º15'00"	2150	32,67
	Tordillo	Valle Hermoso	TVH	35º11'00"	70º14'00"	2200	40,37
	Valenzuela	Valle Noble	VVN	35º19'27"	70º18'40"	1680	25,34
	Chico	Las Loicas	CLL	35º47'34"	70º08'28"	1500	4,16
	Poti Malal	Puesto Gendarmeria	POG	35º52'17"	69º56'56"	1485	3,54
	Grande	La Estrechura	GLE	35º19'18"	70º17'15"	1690	15,99
		La Gotera	GLG	35º52'19"	69º53'27"	1400	4,68
Barrancas	Barrancas	Barrancas	BAR	36º48'26"	69º53'36"	950	13,82
Colorado	Colorado	Buta Ranquil	CBR	37º04'34"	69º44'48"	850	41,27

Análisis exploratorio de datos

Se realizó un análisis exploratorio de datos (**AED**) en todas las estaciones: El primer paso fue rellenar los vacíos de información en las series de caudales medios diarios; para ello se emplearon diferentes procedimientos considerando la cantidad de datos faltantes [8]. Posteriormente, se examinan las muestras para detectar la presencia de datos atípicos o dudosos producto de errores instrumentales, o tipográficos, cambios de métodos de medición, entre otros. Se utilizó el test de Grubbs [9] y el test desarrollado por la [10]. De existir valores dudosos altos, éstos deben ser comparados con la información histórica y de crecientes en sitios cercanos, a fin de excluirlos o no del análisis. El tratamiento de este tipo de información siempre contiene una cuota de subjetividad.

El análisis se completa con la verificación de las condiciones de normalidad e independencia y aleatoriedad de las observaciones ya que estas condiciones producen incertidumbre en los análisis de homogeneidad [11]. Luego, para los 23 sitios correspondientes a las cuencas San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Colorado se definieron las siguientes variables: caudal medio anual ($\mathbf{Q_A}$) y caudales estacionales: caudal de invierno (julio, agosto, setiembre) $\mathbf{Q_I}$, primavera (octubre, noviembre, diciembre) $\mathbf{Q_P}$, verano (enero, febrero, marzo) $\mathbf{Q_V}$ y otoño (abril, mayo, junio) $\mathbf{Q_O}$. Las series sujeto de análisis están conformadas de un valor anual, que representa el promedio del conjunto de observaciones que se realizan a lo largo de un año o estación.

Por otra parte, los caudales mensuales medios en el ciclo anual describen una curva regular, a la que se denomina régimen fluvial [12]. Su importancia radica en el hecho de constituir un indicador de su principal fuente de alimentación y refleja las variaciones estacionales de la temperatura y precipitación. El tipo de régimen fluvial al que pertenece cada río, se determinó en base a la clasificación mejorada de Pardé (1955, cit. [13]), por ser la más completa y la que presenta un mayor número de subtipos.

Las series homogéneas o estacionarias son aquellas que provienen de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales. En los sistemas naturales, la variabilidad es la condición normal y por lo tanto no existen series estrictamente homogéneas. A los fines prácticos pueden ser consideradas como series estacionarias, ya que la información hidrológica empleada proviene de cuencas que poseen muy baja intervención humana. Por otra parte, la sola sospecha de cambios a escala planetaria en las condiciones climáticas obliga a evaluar el régimen de escurrimiento en lo relacionado con modificaciones en la tendencia de largo plazo o cambios abruptos en los valores medios. Se entiende como tendencia al cambio gradual a largo plazo de una variable, mientras que los cambios abruptos son cambios en los valores medios de la variable.

No existe un consenso en la comunidad científica de preferencia de un test a otro. Es por ello que se emplearon los Test **t** de Student [14], SROC (Spearman Rank Order Correlation) muy usado por la Organización Meteorológica Mundial [11], Mann y Kendall [15][16] y sus correcciones por varianza [17] y pre-blanqueo [18]. Para la detección de cambios abruptos existen numerosos métodos [19]. El test más comúnmente usado es el test paramétrico **t** de Student Secuencial. Se basan en la verificación de la igualdad estadística de dos medias muestrales. También, se aplicaron otros test como: Pettitt [20], Buishand [21] o Worsley [22]. Se tratan de test de fácil aplicación y válidos para la detección de un solo punto de cambio. Su principal inconveniente radica en el hecho que en algunos casos previamente debe eliminarse la tendencia en la serie y que las observaciones se encuentren normalmente distribuidas. El análisis de homogeneidad se aplicó en las variables de caudal anual ($\mathbf{Q_A}$) y estacional ($\mathbf{Q_V}$, $\mathbf{Q_P}$, $\mathbf{Q_O}$ y $\mathbf{Q_I}$).

Análisis regional de frecuencias

La gestión de los recursos hídricos debe incluir un análisis de riesgo frente al cambio y variabilidad climática y un análisis de la vulnerabilidad del sector productivo y de la población. Para ello, se debe cuantificar la probabilidad de ocurrencia de las distintas variables hidrológicas que conforman el régimen fluvial en una cuenca particular. Los métodos convencionales de ajuste presentan fuertes limitaciones. Ello es debido a numerosos factores, tales como: longitud y calidad de la serie, errores de muestreo o introducidos por el rellenamiento de datos faltantes y la no verificación de los supuestos básicos de normalidad, independencia y aleatoriedad [23]. El empleo del análisis de frecuencias implica siempre un nivel de incertidumbre, particularmente si se realizan inferencias para períodos de retorno bastante mayor, que los observados.

Con el fin de aumentar la confiabilidad en las estimaciones y paliar el déficit temporal de información, se hace uso de toda la información hidrológica disponible en un espacio geográfico más amplio del que corresponde a una cuenca en particular, mediante la transferencia de información entre los diferentes sitios de la región [24][6], este procedimiento se denomina Análisis Regional de Frecuencias (**ARF-LM)**. El método consiste en combinar los registros de diferentes sitios de aforo, de manera tal que pueda asumirse que tienen similares características; es decir, que todas las series de observación de la región proceden de una misma distribución parental. Se estima una distribución de frecuencias para toda la región, que proporciona información en lugares con datos escasos o carentes de ellos. Reduce la incertidumbre en las estimaciones de los cuantiles, al tomar como cierto que **M** estaciones con **N** años de registro, equivalen a una serie de **MxN** años de longitud. Se usa una variable aleatoria transformada adimensional (cociente entre el valor observado y su valor medio), que tiene la misma

distribución en todos los sitios de una región particular y es aplicable en cualquier parte del espacio, empleando una medida de escala específica [25][26][6].

El procedimiento de **ARF-LM** requiere de la aplicación de distintas etapas. La primera, es la preparación de datos, que previamente debe someterse a un exhaustivo **AED**. Posteriormente, se realiza el establecimiento de regiones homogéneas preliminares, para lo cual existen distintos procedimientos. Entre las técnicas más usuales están: Análisis Clúster o análisis de conglomerados, Análisis de Componentes Principales, Redes Neuronales Artificiales, etc. La identificación de las regiones homogéneas para las variables de caudal anual y estacional se realiza a partir de una súper región conformada por los 23. El grado de homogeneidad de los agrupamientos propuestos se basa en la medida estadística $\mathbf{H_2}$ [24][6]. Ésta, es utilizada para analizar la heterogeneidad del grupo, al comparar la dispersión de los estimadores de las características poblacionales de cada sitio que conforman la región, con la esperada para una región homogénea, obtenida de pruebas de simulación. Hosking y Wallis (1997) proponen que una región es ac*eptablemente homogénea* si $\mathbf{H_2 < 1}$, *posiblemente homogénea* si $\mathbf{1 < H_2 < 2}$ y *heterogénea* si $\mathbf{H_2 > 2}$ [27].

Una vez comprobada la homogeneidad del agrupamiento propuesto, es necesario adoptar una distribución de un conjunto de distribuciones candidatas. Las distribuciones candidatas que se emplearon en el análisis fueron: Generalizada de Valores Extremos (**GVE**), Logística Generalizada (**GLO**), Generalizada Normal (3 parámetros, **GNO**), Normal (**NOR**), Gumbel (**GUM**), Pareto Generalizada (**GPA**), exponencial (**EXP**), Pearson III (**PE3**) y Wakeby (**WAK**). Para la adopción de la función de distribución que mejor ajusta a los datos observados, se emplea una medida de bondad de ajuste $\mathbf{Z^{DIST}}$ definida por [6]. Se considera que el ajuste a determinada distribución es la adecuada, si el estadístico $\mathbf{Z^{DIST}}$ es cercano a cero, siendo un valor razonable cuando se encuentre entre $\mathbf{-1{,}64 < Z^{DIST} < 1{,}64}$ [6][27].

La ponderación del rango de incertidumbre o precisión de los cuantiles estimados con la función de distribución adoptada, es un aspecto central en todo análisis estadístico. Solo se consigue determinando el intervalo de confianza o bandas de error. La evaluación de la precisión y la determinación de los intervalos de confianza, se construyen en base a procesos de simulación tipo Monte Carlo. Se trata de un proceso complejo y engorroso, que requiere un importante esfuerzo computacional [6]. Luego, en cada estación de la región homogénea y para cada frecuencia predeterminada se computan las medidas de error como: error cuadrático medio relativo, el desvío medio relativo y desvío medio absoluto en cada simulación realizada. En las series de cuantiles ordenados simulados, correspondientes a la frecuencia preestablecida **F**, se identifica la magnitud $\mathbf{L_{05}(F)}$ que hace que el 5 % de los valores simulados se encuentre por debajo de ella y otra $\mathbf{U_{95}(F)}$, que hace que el 5 % se sitúe por encima. Así, el 90 % de los valores simulados se encuentra entre $\mathbf{L_{05}(F) \leq x(F) \leq U_{95}(F)}$ y adquiere la forma de un intervalo de confianza, que se denominada, *límites del error al 90 % para el cuantil* **x(F)**, con frecuencia de no excedencia prestablecida **F**. Los limites $\mathbf{L_{05}(F)}$ y $\mathbf{U_{95}(F)}$, conjuntamente con el error y el sesgo constituyen medidas para evaluar aceptablemente la precisión. También, estas magnitudes permiten verificar el modelo probabilístico adoptado.

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis Exploratorio de Datos (AED)

Las series de observación de caudal diario medio fueron completadas y en la mayoría de los casos, la extensión del vacío o *"laguna"* de información no superaba el 10 %. Se han detectado valores atípicos en la cuenca del río San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Grande; en general, la gran mayoría de los caudales atípicos detectados, se presentan en años donde el fenómeno El Niño tuvo una intensidad de moderada a severa [28][29] y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones, dado que las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones diarias, con escasos vacios de información. Posteriormente se calcularon e identificaron las distintas variables hidrológicas a analizar.

Producto de las distintas fuentes de alimentación y de las variaciones estacionales de la precipitación y temperatura, las cuencas cuyanas presentan distintos regímenes fluviales. Uno de ellos es el régimen nival de montaña, donde el efecto orográfico, determina que la fuente de alimentación sea más perdurable y un período de fusión más prolongado y menos pronunciado; ello es debido a que la gradación en altura de la cuenca provoca una disminución en la temperatura y evaporación e incremento de la proporción sólida en la precipitación. Por su posición geográfica, latitud y elevación del sistema montañoso, Los Andes Centrales presentan una importante superficie englazada, que permite que los aportes hídricos provengan de la ablación glaciar y la fusión nival. Se diferencia del régimen anterior por la época de ocurrencia de sus crecientes.

Se verificaron las condiciones de normalidad, aleatoriedad e independencia entre las observaciones de caudal anual y estacional; el número de series analizadas es de 115. Se aplicaron distintos métodos, pero dado que no existe consenso en la comunidad científica de preferencia de un test a otro, se tomó un criterio restrictivo, basado en el hecho que para asumir una determinada condición, ningún método debía rechazar la hipótesis planteada. Se trabajó con un nivel de confianza del 95%. La normalidad es rechazada en el 54 % de las series y la aleatoriedad e independencia es rechazada en solo el 33 y 36 %, respectivamente

En relación al análisis de homogeneidad, existen distintos antecedentes en la región. En el río Tupungato Maza y otros (1997) [30] aplicaron el test de Mann-Kendall y utilizaron una modificación robusta de dicho test. Flamenco (2002) [31]estudió las tendencias en el río Mendoza aforado en Cacheuta. Poblete y Escudero (2013) [32]estudiaron las tendencias con el test de Mann-Kendall y el test de Spearman en el caudal anual del río San Juan y Mendoza. Masiokas y otros (2010) [38], Vich y otros (2005, 2007) [33][34]aplicaron pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas a series más modernas y extensas de 21 variables de caudal en 10 estaciones de aforos de la provincia de Mendoza.

En la cuenca del San Juan, el análisis de homogeneidad de las distintas variables, indicaría que el caudal de invierno (**Q_I**) es creciente. La mayoría de las variables analizadas presentan cambios abruptos en forma dominante alrededor de 1976 o 1977, aunque no hay evidencias estadísticamente significativas de saltos en el caudal anual y primavera, excepto en la estación Km 47,3. Las diferencias podrían explicarse en el hecho que el análisis de homogeneidad fue realizado con la información disponible, sin haber tomado un período común. La misma tendencia fue hallada por Boninsegna (2009) [35] para un período de registro de diez años menos. Por otra parte, Celis y otros (2009) [36] señalan que hay indicios de una leve tendencia negativa en el caudal anual, correspondientes a las series históricas de los ríos Los Patos y San Juan. Poblete y Escudero (2013) [32] encontraron tendencia estadísticamente significativa decreciente en el caudal anual del río San Juan para el período 1909-2010.

En la cuenca del río Mendoza, se observa que el río Vacas presenta tendencia positiva en el **Qv**, el río Cuevas en el **Q_O** y **Q_I**. En el Tupungato, también existen evidencias de tendencias crecientes en el caudal anual, de verano, y primavera. Las series correspondientes a la estación Guido, sobre el río Mendoza, rechaza la hipótesis nula para prácticamente todas las variables analizadas y la tendencia es creciente. Contrariamente en el período 1909-2010 Poblete y Escudero (2013) [32] encontraron una tendencia negativa no significativa en una serie de caudal anual ensamblada con los sitios de aforo Guido y Cacheuta (33°01'S, 69°07'O). Flamenco (2002) [31] encontró un leve decrecimiento en los derrames del río Mendoza (estación Cacheuta). Los caudales parecieran ser mayores que los esperados, si se considera como predictor a la precipitación de Santiago de Chile, ya que esta conserva una fuerte tendencia negativa hasta el presente.

El Tunuyán, únicamente presenta tendencia positiva **Q_I**. En el Diamante, las series, rechazan la hipótesis de la existencia de variabilidad temporal de largo plazo. El Salado, principal afluente del Atuel no presenta tendencia en las variables analizadas. Aguas abajo, en la sección Loma Negra no muestra tendencia significativa en ninguna de las variables analizadas. La siguiente estación de

aforos, La Angostura, muestra un comportamiento muy diferente, ya que el $\mathbf{Q_A}$, $\mathbf{Q_O}$, $\mathbf{Q_I}$, $\mathbf{Q_P}$ poseen tendencia creciente. Este comportamiento aparentemente contradictorio puede deberse en parte, a que el Atuel, entre las dos últimas estaciones circula por la Depresión de Los Huarpes y forma extensos bañados, donde la evaporación e infiltración son muy importantes. También, es conveniente destacar la diferencia en la estimación de la tendencia en el caudal anual, ya que si se aplica a una serie más corta, esta es significativamente creciente. En tanto, si se emplea la serie más larga (incluye distintos sitios de observación debido a la construcción del dique El Nihuil), no puede rechazarse la hipótesis de que no posee variaciones graduales de largo plazo. Boninsegna (2009) [35] expresa que no se observan tendencias significativas en el caudal anual histórico del Atuel, pese a la importante disminución de la superficie cubierta por glaciares [37].

En la cuenca del río Grande, las estaciones ubicadas sobre el cauce principal y sus afluentes no presenta tendencia estadísticamente significativa en ninguna de las variables analizadas. Las series hidrológicas de caudal medio anual del río Barrancas y Colorado, no presentan tendencias significativas, pero si tienen tendencia positiva los $\mathbf{Q_O}$, $\mathbf{Q_I}$

Masiokas y otros (2010) [38] no encuentran tendencias significativas para el caudal anual en los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Colorado. Vich y otros (2007) [34] estudiaron las tendencias de los ríos de la provincia de Mendoza para un período menor (hasta 2001), encontraron resultados similares, excepto en el Atuel donde existían evidencias de cambios graduales, que los nuevos datos y otros métodos no la corroboraron.

Las tendencias positivas detectadas están principalmente relacionadas con las variables vinculadas a los períodos de estiaje y caudal de invierno. Esto podría ser producto del incremento de la temperatura durante el período invernal. La tendencia al aumento de la temperatura [39], hace que el período de fusión nívea comience más temprano, lo que explica el incremento de los distintos caudales estacionales y probablemente que el pico de caudal se anticipe.

La detección de cambios abruptos presenta un gran nivel de incertidumbre, ya que las condiciones requeridas por los distintos test se cumplen en menos del 54 % de las series analizadas. En la mayoría de los sitios del río San Juan se detectaron saltos significativos positivos en la década del 70 en varias variables. Para las variables del río Las Cuevas, Vacas, Tupungato y Mendoza se detectaron principalmente saltos significativos positivos durante la década del 70. Poblete y Escudero (2013) [32] detectan tres períodos de cambio en el caudal anual en los ríos San Juan y Mendoza, el primero 1909-1944 pasando a un período de disminución 1944 a 1970 y a un período mayor entre 1970-2010. Estos períodos coinciden con los encontrados para índices globales atmosféricos tales como la PDO, SST y temperatura global [40]. Por su parte Masiokas y otros (2010) [38] también encuentran un período seco entre 1945-76 y un período húmedo entre 1977-87 y concuerdan en que los saltos en 1945 y 1977 coinciden con los de la PDO.

En la cuenca del río Tunuyán los saltos significativos positivos detectados también son en la década del 70. En el río Diamante en 1979 se detectaron saltos positivos en caudales estacionales de otoño e invierno. En la cuenca del río Atuel, la serie Loma Negra de 30 años de longitud no muestra saltos significativos. La Angostura presenta saltos positivos en la década del 70. En la estación Cañada Ancha la serie consta de 72 años de longitud, se detectaron saltos significativos negativos en la década del 50 y saltos positivos en la década del 70. En la cuenca del Grande, salto negativo en la década del 80 y positivo en 1990. En Barrancas y Colorado existen cambios abruptos positivos en los valores medios para las variables mencionadas en la década del 70.

Principalmente los saltos detectados pertenecen a la década del 70 y resultaron ser positivos, coincidente con los saltos encontrados en la PDO [41]. Otros autores identificaron para algunos ríos localizados entre los 30º y 43°S cambios abruptos en precipitaciones y caudales en la región andina en los años 1945 y 1976 [38][42]. En Chile, Rubio-Álvarez y McPhee (2010) [43] encontraron correlaciones significativas entre la PDO anual y caudales de invierno en el período 1952-2003, para regiones de ríos localizados entre 35° y 37°S. Le Quesne y otros (2009) [37]

reconstruyeron una serie de precipitación que muestra un incremento de largo plazo con dos saltos en 1947 y 1970 coincidentes también con los saltos en la PDO [41].

Una síntesis de los resultados (**AED**, cambios graduales y abruptos) se muestra en la **Tabla II**. La cuenca del río Mendoza es la que presenta el mayor nivel de población y actividad económica, de todo el sistema hidrográfico. Es por ello que a modo de ejemplo, la **Figura 2** muestra las series cronológicas de caudal anual, caudal de primavera, caudal de verano, tendencia y cambios abruptos para el río Mendoza en Guido; además se muestran los desvíos acumulados con relación a la media, donde claramente se manifiesta el punto de quiebre o salto significativo.

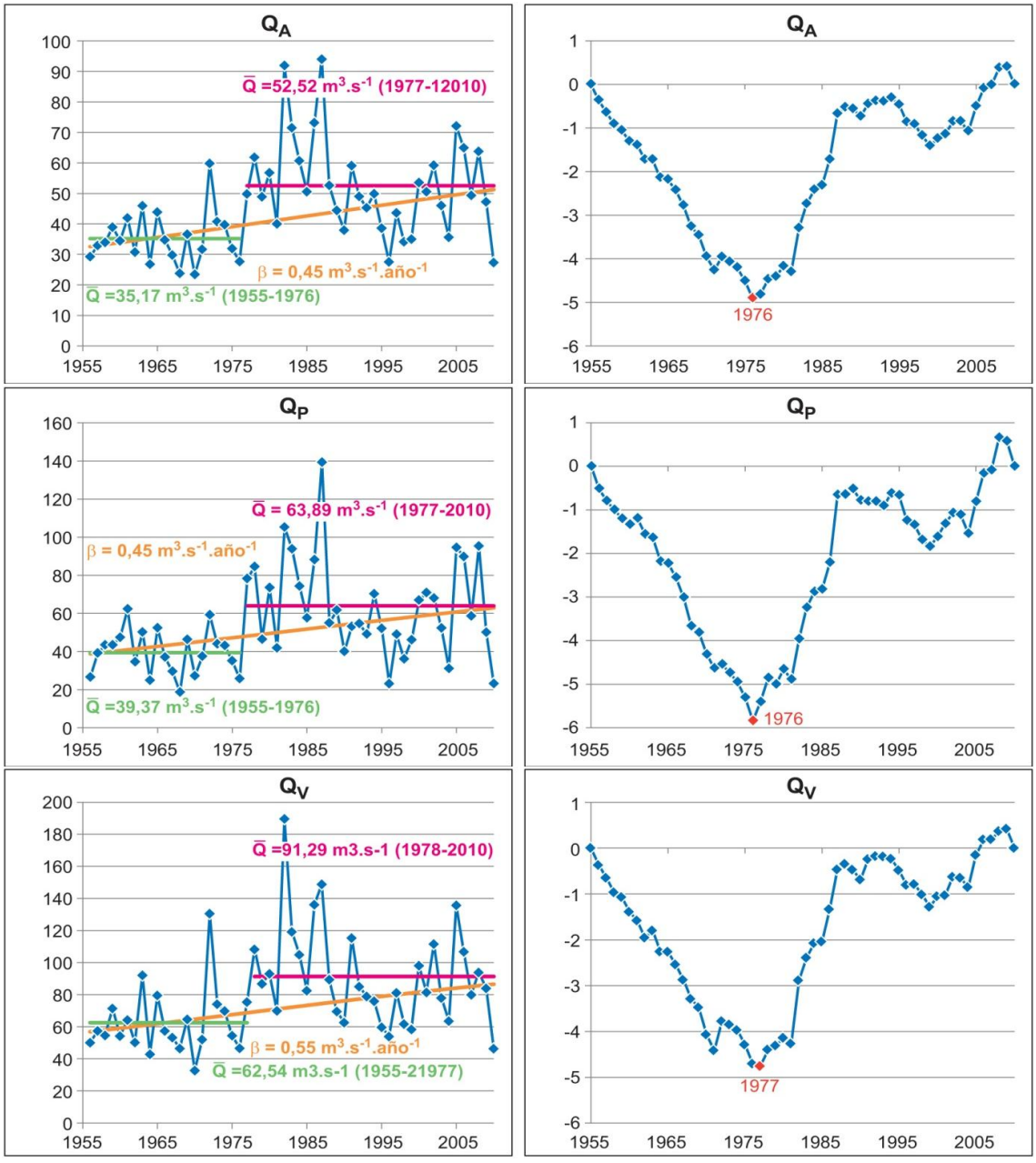


Figura 2: Río Mendoza en Guido para el caudal anual, caudal de primavera y caudal de verano. a) serie cronológica de caudales donde se indican la recta de tendencia y recta de caudal medio para el periodo anterior y posterior al salto. b) curva de desviaciones acumuladas de los caudales adimensionales en relación a la media, donde se observa el punto de quiebre significativo de los valores de la serie.

Tabla I: Análisis exploratorio de datos (**AED**), cambios graduales y abruptos

RIO	ESTACION	Análisis exploratorio de datos (AED)[1]					Cambios graduales [2] tendencia, en $m^3.s^{-1}.año^{-1}$					Cambios abruptos[3] saltos				
		Q_A[4]	Q_V[4]	Q_O[4]	Q_I[4]	Q_P[4]	Q_A	Q_V	Q_O	Q_I	Q_P	Q_A	Q_V	Q_O	Q_I	Q_P
Los Patos	Álvarez Condarco	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1971 (+)	1976 (+)	**ns**	**ns**
	La Plateada	**RAA**	**RAA**	**RRA**	**ARR**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	+	**ns**	**ns**	ns	1976 (+)	1977 (+)	**ns**
San Juan	Km 101	**RAA**	**RAA**	**RRA**	**ARR**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1981 (+)	**ns**
	Km 43,7	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**ARR**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	+	**ns**	1976 (+)	1971 (+)	1976 (+)	1977 (+)	1976 (+)
Vacas	Punta de Vacas	**RRR**	**RRA**	**RAR**	**RAA**	**RAA**	**ns**	+	**ns**	**ns**	**ns**	1971 (+)	1971 (+)	1971 (+)	1971 (+)	1976 (+)
Cuevas	Punta de Vacas	**RRA**	**RAA**	**RAA**	**ARR**	**RAA**	**ns**	**ns**	+	+	**ns**	1971 (+)	1971 (+)	1971 (+)	1972 (+)	1976 (+)
Tupungato	Punta de Vacas	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RAA**	+	+	**ns**	**ns**	+	1976 (+)	1977 (+)	1977 (+)	1978 (+)	1976 (+)
Mendoza	Guido	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RAR**	+	+	+	+	+	1976 (+)	1977 (+)	1977 (+)	1977 (+)	1976 (+)
Tunuyán	Valle de Uco	**RAA**	**RRA**	**RAA**	**RRR**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	+	**ns**	1971 (+)	**ns**	1970 (+)	1979 (+)	**ns**
Diamante	La Jaula	**RAR**	**RAA**	**RRR**	**ARR**	**AAR**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1979 (+)	1979 (+)	**ns**
Atuel	Puente Sosneado	**AAA**	**RAA**	**AAR**	**ARA**	**AAA**	**ns**	-	**ns**	**ns**	**ns**	1987 (-)	1987 (-)	1992 (-)	ns	1987 (-)
	Loma Negra	**RRA**	**RAA**	**AAR**	**ARR**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**
	La Angostura	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RRR**	**RAR**	+	**ns**	+	+	+	1971 (+)	1971 (+)	1977 (+)	1971 (+)	1971 (+)
Salado	Cañada Ancha	**RAA**	**RAA**	**RRR**	**ARR**	**ARR**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1971 (+)	1971 (+)	1953 (-)	1977 (+)	1971 (+)
Pincheira	Pincheira	**AAA**	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**ARA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1970 (+)	ns	1977 (+)	1978 (+)	1977 (+)
Cobre	Valle Hermoso	**RAA**	**RRA**	**RAA**	**RAA**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**
Tordillo	Valle hermoso	**AAA**	**AAA**	**AAA**	**ARR**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	-	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**
Grande	La Estrechura	**AAA**	**RAA**	**AAA**	**AAR**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1986 (-)	1986 (-)	**ns**	1990 (+)	1987 (-)
	La Gotera	**AAA**	**RAA**	**RAA**	**AAA**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**
Valenzuela	Valle Noble	**AAA**	**RAA**	**AAA**	**RAA**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	-	**ns**	1987 (-)	**ns**	1987 (-)	1986 (-)	ns
Chico	Las Loicas	**AAA**	**RAA**	**AAA**	**AAA**	**AAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**
Poti Malal	P. Gendarmería	**AAA**	**RAA**	**RRR**	**AAA**	**RAA**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	**ns**	1985 (-)	**ns**	**ns**
Barrancas	Barrancas	**AAA**	**RAA**	**RRR**	**RRR**	**AAA**	**ns**	**ns**	+	+	**ns**	1971 (+)	1970 (+)	1978 (+)	1976 (+)	1976 (+)
Colorado	Buta Ranquil	**RAR**	**RAR**	**RRR**	**RRR**	**AAA**	**ns**	**ns**	+	+	**ns**	1971 (+)	1971 (+)	1977 (+)	1979 (+)	1981 (+)

(1) Nomenclatura: **A**=no se rechaza la hipótesis, **R**=se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia **α=5 %**, para las pruebas de normalidad, independencia y aleatoriedad, respectivamente.

(2) **ns** no se detecta tendencia estadísticamente significativa, **+** tendencia creciente, **–** tendencia decreciente para un nivel de significancia **α=5 %**.

(3) **ns** no se detecta cambio estadísticamente significativo, **+** valor medio mayor para el período que se extiende desde el año indicado hasta el final de la serie, **–** valor medio inferior para un nivel de significancia **α=5 %**.

(4) Q_A caudal anual, Q_I caudal de invierno (julio, agosto, septiembre), Q_P caudal de primavera (octubre, noviembre, diciembre), Q_V caudal de verano (enero, febrero, marzo), Q_O caudal de otoño (abril, mayo, junio).

Análisis regional de frecuencias

Luego de realizar el **AED** y analizadas la homogeneidad en los distintos sitios, se procede a la formación e identificación de la región homogénea para cada una de las variables analizadas. Luego de un exhaustivo análisis de los agrupamientos, se hallaron 6 regiones homogéneas (ver **Tabla III**). Dos para el caudal anual; la $\mathbf{R_1}$ conformado por 8 sitios en la cuencas del río San Juan y Mendoza; la otra $\mathbf{R_2}$, incluye las 16 estaciones de las cuencas de los ríos Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado. Para la variable caudal de primavera $\mathbf{Q_P}$, se identificaron dos agrupamientos: el norte $\mathbf{R_3}$, que abarca las cuencas del rio San Juan y Mendoza que es ligeramente heterogéneo; el otro $\mathbf{R_4}$, está constituido por 14 estaciones de las cuencas de los ríos: Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excepto el sitio sobre el río Valenzuela y Cobre, sitios que los vacíos de información se presentan en dicho período. Para el caudal de verano $\mathbf{Q_V}$, el agrupamiento $\mathbf{R_5}$ posee 24 estaciones, que se localizan en las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra Grande y Colorado; de esta región se excluyen dos estaciones que se diferencian del resto por su mayor aporte de origen glacial, tales como: un sitio sobre el Salado, principal afluente del Atuel y la estación sobre el Valenzuela, afluente del río Grande. El agrupamiento $\mathbf{R_6}$ del caudal de otoño $\mathbf{Q_O}$, incluye 19 estaciones de las cuencas de los ríos San Juan,-excluyendo a las estaciones sobre el río Los Patos-, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado. Para la variable caudal de invierno, no fue posible identificar un espacio homogéneo.

Es conveniente aclarar que una región homogénea no presupone una correspondencia con una región geográfica particular (por ejemplo, Andes Centrales, ríos patagónicos, etc.); este procedimiento solamente agrupa sitios con similar comportamiento estadístico. Como señalan Hosking y Wallis (1997) [6], las regiones no necesariamente deben ser continuas geográficamente para tener una misma distribución de probabilidad. Las regiones homogéneas halladas tienen además de homogeneidad estadística cierta homogeneidad geográfica y coinciden en parte con las que tradicionalmente han sido distinguidas por las peculiaridades físico geográficas. Por otra parte, los agrupamientos hallados resultan parcialmente concurrentes, con la subregión Cuyo Sur (ríos Tunuyán, Diamante, Atuel y Colorado), una de las cuatro subregiones identificadas por Compagnucci y Araneo (2007) [44], cuya individualización de las subregiones fue realizada en base a la variabilidad de los caudales y su vinculación con las fluctuaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) y el ciclo ENOS (El Niño Oscilación del Sur), para estaciones de ríos cordilleranos localizados entre los paralelos de 28º S a 50º S.

Sobre la base del estadístico de bondad de ajuste condición $\left|\mathbf{Z^{DIST}}\right| < \mathbf{1,16}$ [6], se identificaron los varios modelos de distribución de probabilidad de mejor ajuste en cada la región homogénea, denominada curva de crecimiento regionalizada adimensional. Las funciones de distribución Generalizada Normal, Pearson III, Gumbel y Generalizada de Valores Extremos, son elegidas en los 6 agrupamientos encontrados. Los cuantiles para las estaciones de la región homogénea se obtienen del producto entre las ordenadas de la curva de crecimiento regionalizada adimensional y la media de cada sitio.

Para la determinación del intervalo de confianza o límites del error se emplearon 1000 simulaciones de cada una de las 6 regiones homogéneas. En cada agrupamiento se realizaron estimaciones de la curva de crecimiento adimensional $\mathbf{y(F)^{(m)}}$, de los cuantiles en los distintos sitios de ella $\mathbf{Q_k(F)^{(m)}}$ para recurrencias predeterminadas de **TR** = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años y se calcularon las medidas de sesgo y error por sitio y regional. La selección definitiva del modelo probabilístico se realiza en base del que presente menor error cuadrático relativo medio $\mathbf{R(F)^R}$ y sesgo medio $\mathbf{B(F)^R}$ regional para las 12 frecuencias predeterminadas **F**. Para el agrupamiento caudal anual $\mathbf{Q_A}$, en las subregiones $\mathbf{R_1}$ y $\mathbf{R_2}$ se adoptó el modelo de Gumbel (**GUM**). El error medio es de 17,91 y 13,19 %, respectivamente; el sesgo medio es -8,94 y 3,32 %, con una sobreestimación en el modelo

probabilístico correspondiente a la subregión **R_1**. En las subregiones **R_3** y **R_4** correspondientes al caudal de primavera **Q_P** los modelos de distribución elegidos son Gumbel y la función Generalizada Normal (**GNO**), respectivamente. En ambos casos los errores son del 22,80 y 15,51 % y el desvío medio de 16,66 y 8,31 %, para cada una de las subregiones identificadas. Para las variables caudal de verano **Q_V** y otoño **Q_O** correspondientes a las regiones **R_5** y **R_6** las funciones adoptadas son Exponencial (**EXP**) y Pearson 3 (**PE3**). La región **R_5** presenta un error medio importante de 31,99 % y un sesgo medio de 10,86 %. En la región **R_6** del **Q_O** el error es de 12,82 % y un desvío de -8,46 % (ver **Tabla III**).

Tabla II: Estaciones que conforman la región homogénea para las variables caudal anual **Q_A**, caudal de primavera **Q_P**, caudal de verano **Q_V**, caudal de otoño **Q_O** analizadas y medida **H_2** de heterogeneidad

Cuenca	Río	Estación de aforo	Sigla	Q_A		Q_P		Q_V	Q_O
				R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
San Juan	Los Patos	A. Condarco	**LPA**	**X**		**X**		**X**	
		La Plateada	**LPP**	**X**		**X**		**X**	
	San Juan	Km 101	**SJ1**	**X**		**X**		**X**	**X**
		Km47.3	**SJ4**	**X**		**X**		**X**	**X**
Mendoza	Vacas	Punta de Vacas	**VPV**	**X**		**X**		**X**	
	Cuevas	Punta de Vacas	**CPV**	**X**		**X**		**X**	**X**
	Tupungato	Punta de Vacas	**TPV**	**X**		**X**		**X**	**X**
	Mendoza	Guido	**MEG**	**X**		**X**		**X**	**X**
Tunuyán	Tunuyán	Valle de Uco	**TVU**		**X**		**X**	**X**	**X**
Diamante	Diamante	La Jaula	**DLJ**		**X**		**X**	**X**	**X**
Atuel	Atuel	Pte Sosneado	**APS**		**X**		**X**	**X**	**X**
		Loma Negra	**ALN**		**X**		**X**	**X**	**X**
		La Angostura	**ALA**		**X**		**X**	**X**	**X**
	Salado	Cañada Ancha	**SCA**		**X**		**X**		**X**
Llancanelo	Pincheira	Pincheira	**PIN**		**X**		**X**	**X**	**X**
Colorado	Cobre	Valle Hermoso	**CVH**		**X**			**X**	
	Tordillo	Valle Hermoso	**TVH**		**X**			**X**	
	Grande	La Estrechura	**GLE**		**X**		**X**	**X**	**X**
		La Gotera	**GLG**		**X**		**X**	**X**	**X**
	Valenzuela	Valle Noble	**VVN**		**X**				**X**
	Chico	Las Loicas	**CLL**		**X**		**X**	**X**	**X**
	Poti Malal	P. Gendarmería	**POG**		**X**		**X**	**X**	**X**
	Colorado	Barrancas	**BAR**		**X**		**X**	**X**	**X**
		Buta Ranquil	**CBR**		**X**		**X**	**X**	**X**
Medida de heterogeneidad **H_2**[(1)]				**-0.098**	**0.481**	**1.006**	**0.413**	**0.008**	**0.009**
Función de distribución adoptada				**GUM**	**GUM**	**GUM**	**GNO**	**EXP**	**PE3**
Error Cuadrático relativo Medio (**$R(F)^R$**), en %				**17.9**	**13.2**	**22.8**	**15.5**	**32.0**	**12.8**
Desviación media (**$B(F)^R$**), en %				**-8.9**	**3.3**	**16.7**	**8.3**	**10.9**	**-8.5**

(1) Medida de heterogeneidad del agrupamiento o región, ac*eptablemente homogénea* si **$H_2 < 1$**, *posiblemente homogénea* si **$1 < H_2 < 2$** y *heterogénea* si **$H_2 > 2$**.

Tabla III: Límites del error al 90 % de la curva de crecimiento adimensional para distintas frecuencias

Región		R_1		R_2		R_3		R_4		R_5		R_6	
TR[(1)]	**F**[(2)]	**LI**[(3)]	**LS**[(4)]	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**
10	**0,9**	1,38	1,54	8,08	1,57	2,55	5,32	2,27	3,74	47,21	2,33	1,35	1,48
100	**0,99**	1,79	2,59	13,14	2	2,15	3,48	1,98	2,78	30,79	2,05	1,69	2,17
1000	**0,999**	2,14	3,98	19,05	2,36	1,65	2,04	1,6	1,88	18,64	1,66	1,96	2,9
10000	**0,9999**	2,46	5,76	6,95	1,42	0,86	0,97	0,91	0,99	11,67	0,81	2,18	3,73

(1) **TR**, tiempo de retorno, en años; (2) **F** frecuencia de no excedencia; (3) **LI** límite inferior del error al 90 % para el cuantil **q(F),** adimensional; (4) **LS** límite superior del error al 90 % para el cuantil **q(F),** adimensional.

CONCLUSIONES

Desde épocas coloniales, el desarrollo y la producción agrícola en la vertiente oriental de la cordillera de Los Andes del Noroeste, Cuyo y Patagonia, pudo ser posible gracias al agua utilizada para el riego y producción de energía, proveniente de los ríos con nacientes en la Cordillera y algunas serranías del oeste. La gestión del recurso hídrico requiere de estimaciones de la probabilidad de ocurrencia de variables hidrológicas para la toma de decisiones. El Análisis Regional de Frecuencias basadas en la estadística de momentos **L** (**ARF-LM**) es un procedimiento que permite aumentar la confiabilidad en la predicción de períodos de retorno de caudales con baja frecuencia y en sitios sin observaciones. Se trata de un método de estimación de los parámetros de la función de distribución y cuantiles, en forma eficiente y computacionalmente conveniente.

Se realizó un Análisis Exploratorio de los Datos (**AED**), encontrándose que los valores atípicos detectados se corresponden con años donde el fenómeno ENSO tuvo una intensidad de moderada a severa y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones. El 16 % de las variables presentan tendencias positivas. El 2,5 % presenta tendencias negativas. Se detectaron saltos positivos en la década del 70 en la mayoría de los casos; saltos negativos en la década del 80 y 50. Los saltos encontrados son consistentes con los puntos de cambios detectados en la PDO con alternancia de fases frías y cálidas.

El estudio de heterogeneidad de los agrupamientos resultó *"homogéneo"* para las variables $\mathbf{Q_A}$, $\mathbf{Q_V}$ y $\mathbf{Q_O}$, *"ligeramente heterogénea"* para $\mathbf{Q_P}$ y no se pudo encontrar un agrupamiento para $\mathbf{Q_I}$. Las regiones encontradas contienen entre 8 y 16 sitios, con longitudes de entre 460 y 1276 años. Las regiones homogéneas halladas tienen además de homogeneidad estadística cierta homogeneidad geográfica y coinciden en parte con las que tradicionalmente han sido distinguidas por sus características físico geográficas.

Sobre la base del estadístico de bondad de ajuste condición $\left|\mathbf{Z^{DIST}}\right|$ e intervalo de confianza, se identificaron varios modelos de distribución de probabilidad de mejor ajuste en cada región homogénea, denominada curva de crecimiento regionalizada adimensional. Las funciones de distribución Generalizada Normal, Pearson III, Gumbel y Exponencial son elegidas en los 6 agrupamientos encontrados. En general, los errores de la estimación son bajos siendo el mayor 31,99% para R5.

REFERENCIAS

[1] C. Paoli y G. Malinow. Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Ediciones UNL. Santa Fe, 2010.

[2] A. Calcagno, N. Mendiburo, y M. Gaviño Noviño. Informe sobre la gestión del agua en la Republica Argentina. World Water Visión. 2000.

[3] I. Camilloni, I. y V. Barros. Extremes discharges in the Paraná River and their climate forcing. J. of Hydrology 278 (2003), 94-106.

[4] M. Llano y O. Penalba. A climatic analysis of dry sequences in Argentina. International Journal of Climatology. Vol. 31, No. 4 (2011), 504-513.

[5] G. W. Kite. Frequency and risk analyses in hydrology. Water resource Publications. Colorado, 1977.

[6] J. Hosking y J. Wallis. Regional Frequency Analysis. An approach based on L-Moments. Cambridge University. Reino Unido, 1997.

[7] F. Prohaska. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En Schwerdtfeger E. (ed.), Climate of Central and South America. World Survey of Climatology. Elsevier, Amsterdam, 1976.

[8] P. Gyau-Boakye. Filling gaps in hydrological runoff data. Series in West África. 1993.

[9] EPA. Guidance for data quality assessment. Practical methods for data analysis. EPA QA/G-9. QA00 Update. 2000.

[10] Interagency Advisory Comité on Water Data (USACE). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Bulletin 17 B. U.S. Department of Interior. Geological Survey. Office of Water Data Coordination. 1982.

[11] Z. Kundzewicz y A. Robson. Detecting trend and other changes in hydrological data. WCDMP-45. WMO/TD No. 1013 (2000). Geneva.

[12] E. D. Bruniard. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Publicación Especial No 7 (1994). Academia Nacional de Geografía.

[13] E. D. Bruniard. Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimientos superficial. *Colección Geográfica*, dir. Ricardo Capitanelli, vol. 4 (1992). Buenos Aires, CEYNE.

[14] R. Remington y M. Schork. Estadística Biométrica y Sanitaria. Prentice Hall Internacional. 1974.

[15] R. Hirsch, J. Slack y R. Smith. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality data. Water Resources Res., Vol. 18, No. 1 (1982), 107-121.

[16] J. Westmacott y D. Burn. Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Curchill Nelson River Basin. J. Hydrology, Vol. 202 (1997), 263-279.

[17] K. H. Hamed y A. R. Rao. A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. J. of Hydrology, 204 (1998), 182-196.

[18] S. Yue, P. Pilon y G. Cavadias. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. J. Hydrology, Vol. 259 (2002), 254-271.

[19] S. Rodionov. A brief overview of the regime shift detection methods. Joint Institute for the Study of Atmosphere and Ocean. University of Washington. 2005. hpt://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/Regime_shift_methods_list.htm

[20] A. N. Pettitt. A nonparametric approach to the change-point problem. Applied Statistics, Vol. 28 (1979), 126-135.

[21] T. A. Buishand. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. J. Hydrol., 58 (1982), 11-27.

[22] K. Worsley. On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations. J. Am. Statistic As., Vol. 74 (1979), 365-367.

[23] V. T. Chow, D. Maidment y L. Mays. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Bogotá, 1996.

[24] J. Hosking y J. Wallis. Some Statistics Useful in Regional Frequency Analysis. Water Resources Research, Vol. 29, No. 2 (1993), 271-281.

[25] C. Curmane. Statistical distributions for flood frequency analysis. Operational Hydrology Report no. 33, WMO (series) no. 718 (1989), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

[26] S. Gabriele y N. Arnell. A hierarchical approach to regional flood frequency analysis. Water Resources Research, vol. 27 No.6 (1991), 1281-1289.

[27] A. Robson y D. Reed. Statistical procedures for flood frequency estimation, Volume 3. En: Institute of Hydrology (ed.) Flood estimation handbook. Wallingford, Gran Bretaña, 1999. ISBN 0948540 915.

[28] K. E. Trenberth. The definition of El Niño. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 78 (1997), 2771-2777.

[29] N. Nicholls. Recent trends in the seasonal and temporal behaviour of the El Niño–Southern Oscillation. Geophys. Res. Lett., Vol. 35, No. 19 (2008).

[30] J. A. Maza, L. Fornero, P.M. López, A. Vargas, J. M. Zuluaga y M. Toledo. Simulación matemática de la fusión nival con distintos escenarios climáticos en la cuenca del rio

Tupungato. Informe Interno, PICT 97 Nº 07-00000-0725. Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Andino. 46 p. 1997.

[31] E. Flamenco. Cambio del régimen hídrico en importantes ríos de la República Argentina. Informe inédito. INTA. Instituto de Clima y Agua. Castellar, 2002.

[32] A. G. Poblete y S. A. Escudero. La sequía en los Andes Centrales y su repercusión en los ríos San Juan y Mendoza. IV Congreso Nacional de Geografía. XI Jornadas cuyanas de geografía. ISSN 2346-9698. 2013.

[33] A. I. J. Vich, P. M. Lopez y L. I. Villegas. Detección de tendencias en el régimen hídrico de los principales ríos de la provincia de Mendoza (Argentina). En: CONAGUA2005. XX Congreso Nacional del Agua. III Simposio de Recursos Hídricos del Conos Sur. Resúmenes de Trabajos, pp. 343, en CD-ROM, trabajo completo. ISBN 987-22143-0-1. Mendoza, 2005.

[34] A. Vich, P. Lopez y M. Schumacher. Trend detection in the water regime of the main rivers of the Province of Mendoza, Argentina. GeoJournal, Vol. 70 (2007), 233-243.

[35] J. Boninsegna. Impacto del Cambio Climático en la región Centro Oeste de Argentina y posibles medidas de adaptación. Foro: Escenarios climáticos y medidas de adaptación. Secretaria de Ambiente de la nación. Buenos Aires. 25 – 26 de febrero de 2009. www.ambiente.gov.ar/archivos/web/AdCC/File/09_boninsegua.pdf

[36] A. Celis, F. Ostuni, G. Kisilevsky, E. Schwartz, S. Fernández Bouzo y L. Lopresti. Documento País: Riesgos de desastres en Argentina. CAPITULO 5: Cambio climático: variabilidad pasada y una prospectiva de las amenazas de acuerdo a los escenarios futuros. Cruz Roja Argentina, Centro Estudios Sociales y Ambientales. Buenos Aires, 2009.

[37] C. Le Quesne, C. Acuña, J. Boninsegna, A. Rivera y J. Barichivich. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281 (2009), 334–344.

[38] M. Masiokas, R. Villalba, B. Luckman y S. Mauget. Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. Journal of hydrometeorology. Vol. 11 (2010), 822-831.

[39] J. Boninsegna y R. Villalba. Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales. Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de Cambio Climático. SAyDS, Fundación e Instituto Torcuato Di Tella. 26 pp. 2006.

[40] A. G. Poblete y J. L. Minetti. Detección de cambio de régimen en el derrame anual del rio San Juan vinculado con cambios de larga escala en el clima (2010).

[41] B. S. Giese, S. C. Urizar y N. S. Fuckar. Southern Hemisphere Origins of the 1976 Climate Shift Benjamin. Geophysical research letters, Vol. 29, No. 2 (2002), 1014.

[42] J. M. Quintana y P. Aceituno. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30–43°S. Atmósfera, Vol. 25, No. 1 (2012), 1–22.

[43] E. Rubio-Álvarez y J. McPhee. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. Water Resources. Research, Vol. 46 (2010) W05514. http://dx.doi.org/10.1029/2009WR007982.

[44] R. Compagnucci y D. Araneo. Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. Ingeniería Hidráulica en México. XXII (2007):23-35.

PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS EN LA ATMOSFERA MEDIA POR EYECCIÓN DE MASA CORONAL

Zotto E. M.[a,b]*; Zossi M. M.*[b,c]

[a]*Departamento de Formación Básica, FTyCA, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*
[b]*Laboratorio de Física de la Atmósfera, Departamento de Física, FaCET, Universidad Nacional de Tucumán, ARGENTINA*
[c]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, ARGENTINA*

e-mail:emzotto@tecno.unca.edu.ar, mzossi@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

Cuando un evento protónico solar (Solar Proton Event, SPE), consecuencia de una eyección de masa coronal, EMC (Coronal Mass Ejection, CME) tiene lugar, precipitan en la Tierra una gran cantidad de protones e iones pesados. La altura a la cual estas partículas depositan su momento depende del espectro de energía de las mismas. El tiempo transcurrido entre su ocurrencia y el que repercute en nuestro planeta es variable, oscilando entre horas y días. En el año 2007, se realizaron los primeros intentos en describir la variabilidad geográfica y temporal de la precipitación de partículas energéticas a escala global haciendo uso de una serie de instrumentos. Luego de la ocurrencia de una EMC, con la subsiguiente producción de una tormenta geomagnética, ingresan partículas de intensa energía desde la magnetosfera a la alta atmosfera, hecho comúnmente observado en la ocurrencia de brillantes auroras que pueden extenderse hasta latitudes medias, y en algunos casos en la alteración de sistemas tecnológicos. En este trabajo se estudian los efectos del arribo a la atmosfera terrestre de la EMC del 21 de enero de 2005, investigándose en primer lugar, la distribución geográfica de las precipitaciones de partículas en la atmósfera, tratándose de identificar los procesos de precipitación, para lo cual se combinaron los datos de receptores de ondas de radio subionosféricas VLF, globos de gran altitud MINIS, Riómetros, y magnetómetros de pulsación. Se demuestra que, tras la llegada de la EMC hay diferencias significativas en la precipitación de partículas energéticas entre el lado diurno y el lado nocturno conducido por diferentes interacciones onda partícula, así como diferencias significativas en la estructura latitudinal. También se analizaron datos de contenido de ozono registrados en estaciones de latitudes medias y altas del hemisferio sur, encontrando variaciones poco significativas los días posteriores a la ocurrencia de la tormenta geomagnética estudiada.

Palabras Clave: Eyección de masa coronal, precipitación de partículas energéticas solares, tormentas geomagnéticas

INTRODUCCIÓN

Los eventos de acoplamiento de energía del viento solar[1] con la magnetosfera, más energéticos y de mayor duración, generan las conocidas tormentas geomagnéticas (TGs), intervalos de tiempo en los cuales un campo eléctrico interplanetario de convección suficientemente intenso y persistente conduce, a través de una importante energización del sistema magnetosfera-

[1] viento solar = plasma de electrones e iones que se mueven radialmente hacia fuera desde el Sol (Walt M., 1994).

ionosfera, a un anillo de corriente fuertemente intensificado capaz de exceder algún umbral de cuantificación del índice Dst del período de tormenta (González W. et al., 1994 [1]). Las condiciones de tormenta pueden durar desde horas hasta días, y a veces una nueva tormenta comienza antes que la magnetosfera se haya recuperado de la perturbación anterior. Sydney Chapman (1888-1970) fue quien introdujo el concepto de tormenta geomagnética (Akasofu S-I, 2002 [2]).
Las fulguraciones solares y las EMCs en la atmósfera del Sol son los fenómenos más importantes asociados a una tormenta magnética (Koskinen H., 2011 [3]).
Las fulguraciones solares son variaciones de la actividad solar de corta duración, explosiones intensas y localizadas (Hargreaves J., 1992 [4]). Estructuras delgadas oscuras en el Sol conocidas como filamentos o prominencias (hojas verticales de material muy denso y frío en la corona solar) crecen durante meses hasta 1000 mm de longitud. De todas las características solares las prominencias son las más estables y pueden durar varios meses; a veces, se vuelven inestables y estallan hacia afuera para dar lugar a las fulguraciones (Kamide Y. and Chian A., 2007 [5]). Generalmente tienen tres etapas: la previa, donde se libera energía magnética y se emiten rayos-X blandos; los impulsivos, donde protones y electrones son acelerados a energías superiores a 1 MeV y se emiten ondas de radio, rayos X duros y rayos gamma; y la etapa de decaimiento donde se puede detectar acumulación gradual y descomposición de rayos X blandos. La duración de estas etapas puede ser tan corta como pocos segundos o tan larga como una hora. A medida que se libera energía magnética, partículas, incluidos electrones, protones y núcleos pesados, se calientan y aceleran en la atmósfera solar (la corona solar). La frecuencia de su producción coincide con el ciclo de once años del Sol, en un mínimo es poco común que se detecten y aumentan en número cuando el Sol se acerca al máximo de su ciclo [http://hesperia.gsfc.nasa.gov/].
Las EMCs, representan gigantescas expulsiones de masa y flujo magnético del Sol, son fenómenos violentos que al alcanzar la magnetosfera de la Tierra, en algunos casos, interrumpen todo tipo de logro de la era industrial y de la información.
Desde hace más de medio siglo, se conoce que partículas extraordinariamente energéticas pueden ser lanzadas al espacio durante una fulguración solar (Lang, K., 2009 [6]). Hoy en día, se utilizan los términos Precipitación de Partículas Energéticas (EPP -Energetic Particles Precipitation) para denotar los electrones de alta energía, protones u otros iones que llegan a la Tierra desde el Sol. Actualmente la EPP incluye los Eventos Protónicos Solares (SPEs – Solar Proton Events) y la precipitación de electrones energéticos (EEP –Energetic Electron Precipitation). Además de partículas energéticas de origen solar llegan a nuestra atmosfera rayos cósmicos (CR – Cosmic Ray) (Seppälä et al., 2014 [7]). Eventos protónicos solares, que pueden estar asociados a EMC o a fulguraciones solares, son un elemento importante del clima espacial (Lang, K., 2009 [8]) al igual que los demás fenómenos de partículas.

Registro de actividad geomagnética

Entre los índices geomagnéticos, el Dst es probablemente el que registra con mayor precisión las variaciones de la corriente de anillo ecuatorial aunque es cuestionado por algunos autores. El índice Dst fue introducido en Sugiura M., 1964 [9] para proveer una medida de la intensidad del anillo simétrico de corriente. Las tormentas generalmente se dividen en tres fases según el valor de Dst: fase inicial (Dst aumenta con valores positivos); fase principal (Dst puede alcanzar valores negativos muy altos) y fase de recuperación (Dst regresa gradualmente al nivel normal). Según Sugiura M. and Chapman S., 1960 [10] se llaman tormentas: intensas a aquellas con pico de Dst $\leq$ -100 nT; moderadas a las con pico de Dst entre –50 nT y –100 nT; y débiles las con pico de Dst entre –30 nT y –50 nT. En Tsurutani B. et al., 2007 se define como supertormenta a un evento con menor índice Dst < -250 nT.
El índice Kp, definido en Bartels, 1949 [11] y adoptado por la IATME (International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity) en 1951, se pensó como una medida del nivel promedio de actividad global (subíndice p por planetario) muestra una gran sensibilidad a

cierta actividad auroral y evalúa los efectos de partículas energéticas que llegan a la atmósfera superior de la Tierra después de períodos de intensa actividad solar. Desde enero de 1997, Kp es calculado por el GeoForschungsZentrum, Potsdam.

El entorno geoespacial

Las emisiones solares que afectan la atmósfera terrestre y el campo geomagnético exterior forman parte del entorno geoespacial, región a partir de los 50-70 km sobre la superficie de la Tierra hasta decenas de radios terrestres (RT), las interacciones: entre la materia terrestre y la radiación solar, entre los campos magnéticos solares y terrestres, entre los campos magnéticos y partículas cargadas; y las fronteras: entre la materia solar y terrestre y entre las regiones dominadas por los diferentes patrones de flujo.
La atmosfera superior en general es muy sensible a fulguraciones solares. Además de radiación el Sol también emite materia, el viento solar, que constituye la segunda conexión vital entre el Sol y la Tierra, aunque no penetra hasta el suelo los comportamientos más notables son directamente atribuibles a variaciones del viento solar y su campo magnético. En niveles superiores (100 km) penetra ultravioleta y rayos X que emanan del Sol, fotones suficientemente energéticos para disociar y ionizar el material atmosférico, alterando la composición de la atmósfera (Hargreaves J., 1992 [12]). Por lo tanto, se podría esperar que el viento solar afecte el campo geomagnético mediante la formación de una onda de choque de 2-3 Radios Terrestres (RT; 1RT = 6,37 x 10^3 km, radio terrestre medio) (Walt M., 1994 [13]). Al acercarse a la Tierra, el viento solar interactúa con el campo geomagnético que lo confina, se encapsula en el lado diurno entre los 5 y 10 RT y se extiende por cientos de RT en el nocturno. Esta región es designada como magnetosfera de la Tierra, su forma y tamaño no sólo dependen de la velocidad y densidad del viento solar, sino también de la magnitud y dirección del campo magnético del Sol (Alperovich L. and Fedorov E., 2007 [14]).
Por la baja presión encima de los 100 km, especies ionizadas no se recombinan rápidamente, hay una población permanente de iones y electrones libres: la ionosfera, región eléctricamente conductora que puede soportar intensas corrientes eléctricas. El medio ionizado también afecta a ondas de radio, y como plasma puede sostener y generar una variedad de ondas, interacciones e inestabilidades que no se encuentran en un gas neutro. No hay un límite claro entre la ionosfera y la magnetosfera, pero entre la magnetosfera y el viento solar está la magnetopausa, donde energía se acopla a la magnetosfera desde el viento solar y se determina gran parte del comportamiento de la magnetosfera y de la ionosfera en altas latitudes. En el sentido contrario al Sol la magnetosfera se extiende a favor del viento en una larga cola, la cola magnética, donde se producen procesos de plasma de gran importancia para las regiones geoespaciales (Hargreaves J., 1992 [15]). Dentro de la magnetosfera, hay una región especial de plasma fría, la plasmasfera, limitada por la plasmapausa. La concentración de plasma frío dentro del plasmasfera disminuye monótonamente con la distancia radial R en el plano ecuatorial de 10^4 cm^{-3} en R = 1,2 RT hasta 10^2-10^3 cm^{-3} en el límite interior de la plasmapausa. La distancia geocéntrica de la plasmapausa es controlada por la actividad magnética y solar y fluctúa entre aproximadamente 6 RT para una magnetosfera tranquila y 3 RT para condiciones perturbadas (Alperovich L. and Fedorov E., 2007 [16]).

Mecanismos de precipitación de electrones

Cuando una eyección de masa coronal (EMC) alcanza la magnetosfera de la Tierra, la magnetopausa del lado diurno es comprimida hacia la Tierra. En órbita geoestacionaria se observan aumentos o disminuciones en los flujos de electrones relativistas (Reeves G., 1998 [17]) que dependen de la severidad del choque asociado con la EMC y de la interacción entre procesos de pérdida y aceleración (Horne R. and Thorne R., 2003 [18]).

Se cree que los electrones energéticos disminuyen de las órbitas geoestacionarias (del cinturón de radiación externo) por tres posibles mecanismos: (1) movimiento adiabático (asociado con la formación de una corriente de anillo en tiempo de tormenta, llamado efecto Dst (Thorne R. et al., 2005 [19]); (2) conexión con la magnetopausa; y (3) la precipitación en la atmósfera (Clilverd M. et al,2007 [20]).
La precipitación de electrones relativistas en la atmosfera ha sido sugerida como el mecanismo principal de pérdida de electrones del cinturón de radiación durante TGs intensas. El estudio de esta región es de interés por encima de ~200 km y por debajo de alrededor 7 RT en el ecuador. La geometría magnética limita este volumen a latitudes magnéticas ecuatoriales de 65° (Walt M., 1994 [21]).
El atrapamiento de las partículas energéticas cargadas surge de la interacción entre una carga eléctrica en movimiento y un campo magnético estático B. Los principios se expresan mejor en términos de invariantes adiabáticas. Si la velocidad de una partícula en la magnetosfera forma un ángulo con el campo magnético B su trayectoria es una espiral (Hargreaves J., 1992 [22]). El ángulo entre el vector velocidad de una partícula cargada y el vector campo magnético B del medio se conoce como ángulo pitch (en inglés: pitch-angle) (Gianibelli J. y Quaglino N., 2000 [23]) también llamado ángulo de paso. Como una partícula se mueve desde el ecuador hacia latitudes más altas en un campo dipolar se encuentra con el aumento de B y por lo tanto el ángulo de paso aumenta considerando la primera invariante adiabática [$sen^2\alpha \propto B$]. Cuando $\alpha = 90°$, el movimiento hacia adelante se detiene ($v_{//} = 0$), siempre que no alcance antes la atmosfera, y la partícula se refleja de nuevo a lo largo del campo hacia el ecuador. El punto de reflexión se denomina punto espejo (en inglés: mirror point) siendo este el mecanismo por el cual la partícula está atrapada en el campo geomagnético (Hargreaves J., 1992 [24]). El rango de ángulos "pitch" para "puntos espejo" de partículas debajo del tope de la atmósfera se llama cono de pérdida (en inglés: loss cone). Las partículas con tales ángulos de retorno son eliminadas por colisiones con la atmósfera (Gianibelli J. y Quaglino N., 2000 [25]). Para una partícula dada la posición del punto espejo se determina por el ángulo "pitch" que la partícula cruza el ecuador (es decir, donde el campo es más débil) (Hargreaves J., 1992 [26]). En la región interior las pérdidas implican una interacción con la atmósfera cerca de los puntos de reflejo, con el retraso y cambio de carga de los protones, y la dispersión en el cono de pérdida de electrones después de lo cual los electrones pierden energía por ionización de gases atmosféricos. La precipitación de electrones en la atmósfera conducidos dentro del llamado cono de pérdida por rebote (que se pierden por absorción en la superficie de la Tierra después de un rebote (Prölss G., 2004 [27]), también se ha sugerido como uno de los mecanismos primarios de pérdida, a través de la interacción con electrones de ciclotrón armónicas (Horne R. and Thorne R., 2000 [28]), por ondas electromagnéticas iónicas ciclotrónicas (EMIC) (Summers D. and Thorne R., 2003 [29]), ambos separadamente o en combinación (Cliverd M. et al., 2006 [30]). Las partículas que se sumergen en la atmósfera superior más densa, son desviadas de su trayectoria de rebote por las colisiones y, finalmente son absorbidas (Prölss G., 2004 [31]). Excepcionalmente protones energéticos solares se detectan en la superficie de la Tierra, necesitan energías de aproximadamente 1 GeV para girar en espiral alrededor de los campos magnéticos terrestres con un radio suficientemente grande para llegar al suelo. Protones de baja energía se mueven a lo largo de los campos magnéticos terrestres en una espiral más apretada (cinturón interno de Van Allen), y se canalizan hacia las regiones polares donde "engrosan" la densidad protónica de la ionosfera (Lang K., 2009 [32]).
En Clilverd M. et al., 2007 [33] clasificaron la precipitación de electrones energéticos en tres tipos diferentes según el lugar donde fueron observados: uno globalmente, uno del lado diurno y otro del lado nocturno.

La tormenta geomagnética de enero de 2005

Previo al período estudiado en Clilverd M. et al., 2007 [34] se produjo un evento protónico de > 10 MeV el 16 de enero de 2005, el flujo máximo fue de 365 pfu[2] . El 17 de enero se produjo una fuerte inyección de protones después de la llamarada X3.8 con EMC y alcanzó su punto máximo con 5040 pfu en 17/1750 UTC[3]. El evento decayó a ~19 pfu en las primeras horas del 20 de enero, cuando se produjo una nueva fulguración de protones, la X7, con EMC y SPE. Los protones de energías > 10 MeV alcanzaron un máximo de 1860 pfu en 20/0810 UTC. Los protones >100 MeV alcanzaron un máximo de 652 pfu en 20/0710 UTC, éste fue el nivel de flujo de protones >100 MeV más grande observado desde octubre de 1989 (680 pfu). El evento de protones de > 10 MeV finalmente terminó a las 22/1755 UTC [http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/].

Durante el mes de enero de 2005 se registraron varias tormentas geomagnéticas. En el Sol, la región activa (AR) 10720 creció rápidamente y mostró alta actividad desde el 10 hasta el 22 de enero. Desde el 14 al 21 de enero, se produjeron cinco fulguraciones de clase X y dieciocho de clase M (Wang J. et al., 2009 [35]). En los registros del índice Dst se observó el 12 y 17 de enero de ese año moderadas perturbaciones con valores pico de ~ -50 nT y ~ -60 nT, siendo el último bastante prolongado. A las ~ 09:00 UT del 18 de enero de 2005 se registró un valor mínimo absoluto de Dst para todo enero de 2005 de -103 nT.

El 20 de enero 2005 a las 06:36 UT estalló en la región activa 10720 cerca del noroeste del limbo solar una fulguración X7.1, la que tuvo su fase máxima a las 07:01 UT, y se desvaneció a las 07:26 UT (Wang J. et al., 2009 [36]). En Clilverd M. et al., 2007 [37] se afirma que un inusual evento protónico le siguió alrededor de 20 min. También fue seguida por una CME dirigida hacia la Tierra que se alejó del Sol a una velocidad de aproximadamente 882 km s^{-1} con una clara aceleración (Wang J. et al., 2009 [38]) el 21 de enero de 2005, con un Kp = 8, y la recuperación de la ionósfera debido a la disminución de los niveles de flujo de protones (Clilverd M. et al., 2007 [39]).

En la figura 1a) se observa un aumento repentino en la velocidad del viento solar, de ~600 a ~900 km/s, el día 21 de enero de 2005 a las ~17:15 UT. Este cambio en el viento solar se observa a las ~18:00 UT en el registro del índice Dst, alcanzando un valor mínimo relativo de ~ -97 nT entre las 06:00 y 07:00 UT del día 22 de enero, por lo que este se considera el inicio de una tormenta que tuvo por características ser moderada y prolongada (ver Figura 1a).

El gráfico de la densidad protónica del viento solar (ver Figura 1b) indica en ese día, simultáneamente, una violenta expulsión de masa y flujo magnético del Sol, con un incremento en la densidad de carga de 6 a 16 protones/cm3 en menos de 2 min, indicando claramente que la tormenta del 21 de enero es producto de una fuerte EMC [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/swepam_l2desc.html].

A la vez, la tormenta geomagnética con Dst ≈ -100 nT, condujo a una fuga de electrones relativistas en una órbita geosincrónica a partir de las 17:10 UT. A las 18:00 UT en el GOES-10 y el GOES-12 el flujo de electrones > 2 MeV decreció en tres órdenes de magnitud (Clilverd et al., 2007 [40]) (ver Figura 1c).

La sucesión de eventos destacados fue: una repentina y gran llamarada con SPE el 20 de enero y una EMC intensa sin SPE el 21 de enero, ambas en el año 2005.

La llegada de la EMC se observó en todo el planeta simultáneamente a las 17:12 UT.

En Clilverd M. et al., 2006 [41] se muestra que durante el descenso repentino del flujo de electrones geosincrónicos > 2 MeV en el lapso de 17:10 -17:20 UT, del 21 de enero de 2005, se observó la precipitación de electrones relativisticos (Relativistic Electron Precipitation, REP) a gran escala en la atmósfera reportada por los globos MINIS. Los globos también observaron cantidades significativas de rayos-X desde las 17:10 a las 17:40 UT el 21 de enero de 2005 en L = 3,5 y L = 4,1 en el hemisferio Sur (Clilverd et al., 2007 [42]). Durante el evento de EMC del 21 de enero de 2005 la precipitación total en la atmosfera podría contar con pérdidas por arriba

[2] pfu= proton flux units = $^{particles}/_{sr \cdot cm^2 \cdot s}$

[3] UTC= Current Coordinated Universal Time

del 50% del flujo de electrones de >2 MeV en el anillo de radiación externo (Clilverd M. et al., 2006 [43]).

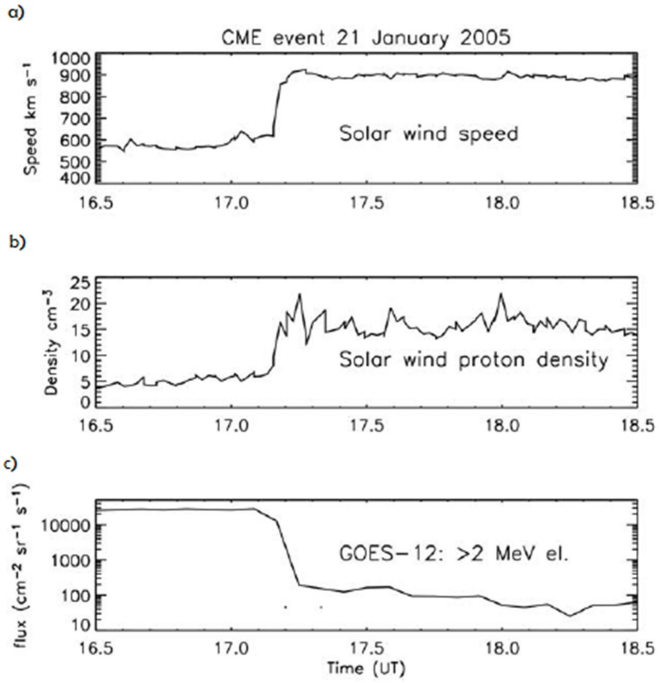


Figura 1. Cambios en: a) el viento solar y b) la densidad protónica asociados con el choque de la EMC del 21/01/2005, c) impacto de la EMC sobre el flujo de electrones relativistas del GOES medidos en órbita geoestacionaria (Clilverd et al., 2007).

Efectos sobre el contenido total de ozono

Con el fin de analizar el efecto sobre el ozono total en el hemisferio sur, de la precipitación de partículas energéticas durante la tormenta geomagnética del 22 de enero de 2005 (valor mínimo del índice geomagnético Dst = -97 nT, 06:00 UT), se consideraron los valores diarios medidos por TOMs (Total Ozone mapping spectrometer).

Como indicador del contenido total de ozono (TOC - Total Ozone Content), se empleó el índice TOCR, desviación relativa del contenido total de ozono diario, TOC, con respecto a los días tranquilos mensuales TOCQ (ver Ec. 1):

$$TOCR = \frac{TOC\text{-}TOCQ}{TOCQ} \qquad (1)$$

donde TOCQ, es el promedio del TOC en los días geomagnéticamente tranquilos del mes de cada tormenta geomagnética. El valor diario, TOC, en unidades Dobson (DU), fueron obtenidos de las estaciones incluidas en la red TOMSEPOVP (Total Ozone mapping spectrometer) / Earth Probe Ground Station Overpass) (TOMS Science Team (2007),TOMS/Earth Probe Ground Station Overpass Data,version 008, Greenbelt, MD, USA:NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center(GES DISC), Accessed Enter User Data Access Date at http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datacollection/TOMSEPOVP_V008.html). Las estaciones la red TOMSEPOVP con latitudes geomagnéticas mayores a 60°S que se disponen para este trabajo se listan en Tabla I.
El tiempo magnético local de cada estación se calculó según, Ono (1987) [44], usando la Ec. 2:

$$TML = \frac{M_l - M_p}{15.0} + UT \qquad (2)$$

Donde M_l es la longitud geomagnética de la estación y M_p es la longitud geomagnética del polo norte geográfico. Las longitudes usadas corresponden al año 2000.
En la Figura 3 se grafican los valores TOCR de las diferentes estaciones indicadas en Tabla I para la tormentas estudiada. Se consideró un periodo de 30 días centrado en el día del máximo desarrollo de la tormenta geomagnética analizada (22 de enero de 2005)

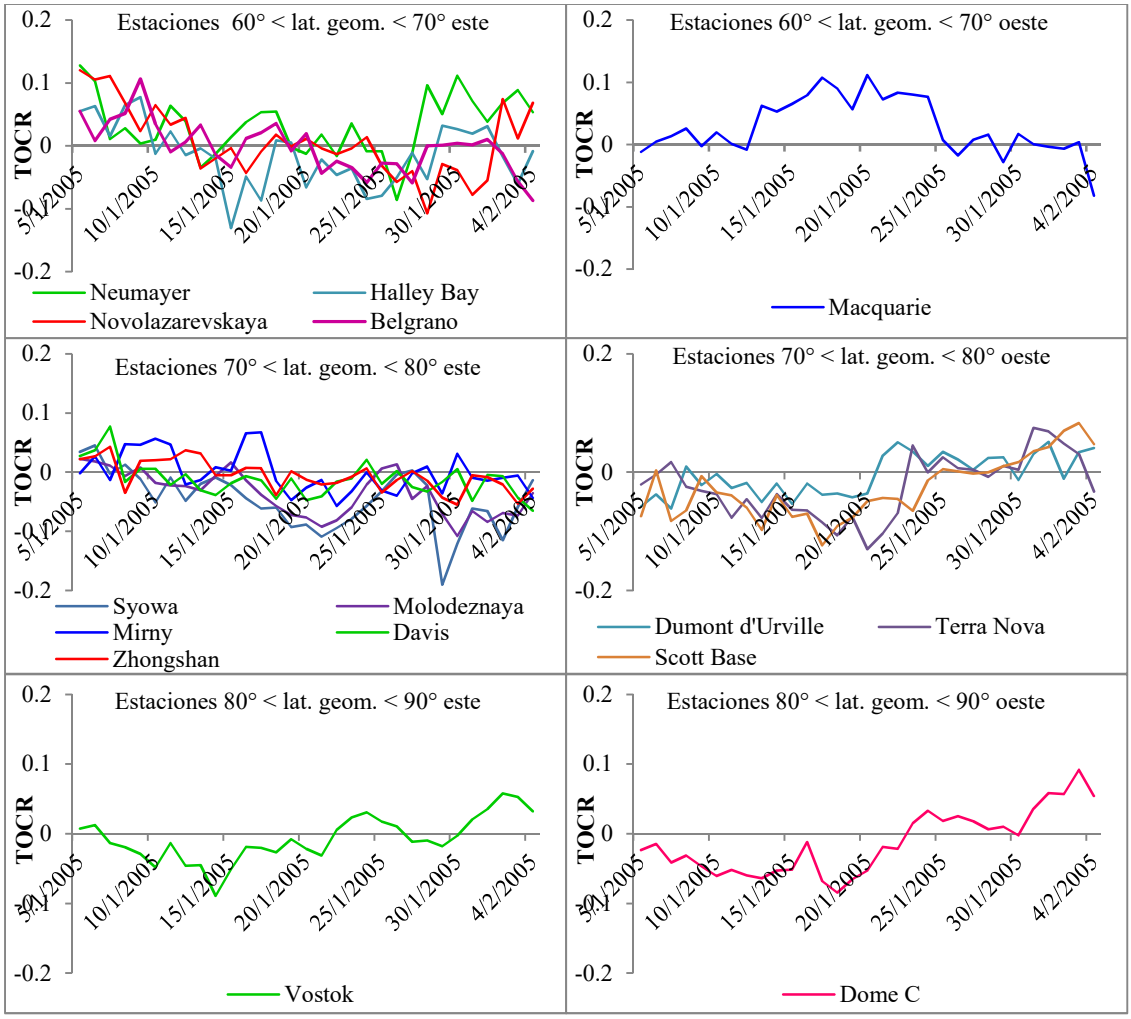


Figura 2. Desviación relativa del contenido total de ozono diario, TOCR. Se consideraron todas las estaciones del hemisferio sur de las cuales existen datos para determinar los posibles efectos sobre el ozono total que se encuentran en latitudes geomagnéticas mayores a 60° del HS. Se agradece a TOMS Science Team (2007),TOMS/Earth Probe Ground Station Overpass Data,version 008, Greenbelt, MD, USA:NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center.

Tabla I. Estaciones usadas para el análisis de los efectos de la precipitación de partículas energéticas sobre el contenido total de ozono. Se indica el tiempo magnético local (TML) de cada estación cuando tiene lugar el máximo de la tormenta geomagnética estudiada.

Estación		Latitud Geomag. S	Long Geomag.	TML (hs) 22/01/2005	Precipitación
Belgrano	Antártida	68.52	20,27E	2:36	Choque
Halley.Bay	Antártida	66.85	26,89E	3:02	
Neumayer	Antártida	64.16	43,10E	4:07	Choque
Novolazarevskaya	Antártida	67.06	57,63E	5:05	
Syowa	Antártida	70.2	82,98E	6:46	
Molodeznaya	Antártida	70.21	90,91E	7:18	
Zhongshan	Antártida	76.93	123,74E	9:29	choque + chorus de VLF y ECH
Davis	Antártida	76.46	127,45E	9:44	
Mirny	Antártida	76.22	153,48E	11:28	
Vostok	Antártida	88.95	163,11E	12:07	
Dome C	Antártida	84.15	137,73W	16:04	Choque + EMIC
Dumont d'Urville	Antártida	73.93	129,47W	16:37	
Macquarie	Australia	60.33	115,58W	17:32	
Terra Nova Bay	Antártida	77.05	83,63W	19:40	Choque
Scott_Base	Antártida	79.06	70,31W	20:33	

Lado nocturno Lado del amanecer Lado diurno Lado del atardecer

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los posibles efectos de la precipitación de partículas energéticas (EPP -Energetic Particles Precipitation) sobre el contenido total de ozono en el hemisferio sur cuando tiene lugar el máximo desarrollo de la tormenta post EMC ocurrida el 22 de enero de 2005 con un valor mínimo de Dst de -97 nT. Se investigó en primer lugar, la distribución geográfica de la precipitación de partículas en la atmósfera, tratándose de identificar los procesos de precipitación, para lo cual se analizaron los datos y resultados encontrados por Clilverd M. et al., 2007 [45] de varios instrumentos combinados: receptores de ondas de radio subionosféricas VLF, globos de gran altitud MINIS, Riómetros, y magnetómetros de pulsación.
Para el estudio de la atmosfera media se consideraron todas las estaciones del hemisferio sur que cuentan con datos para determinar los posibles efectos de la EPP sobre el contenido total de ozono, que se ubican en latitudes geomagnéticas mayores a 60° (ver Figura 2).
Los resultados de los efectos observados en las distintas estaciones podrían resumirse en:

- en la estación Macquarie) debería haberse producido una precipitación por choque + EMIC pero no se observa variación en el CTO. En estaciones cercanas se observan aumentos muy pequeños en el CTO: en estaciones entre los -70º y -80º (Dumont y Terra Nova) y entre los -80º y -90º de latitud geomagnética (Dome C) (que serían efecto del choque), todas de longitudes geomagnéticas oeste. En las estaciones del este se observan algunas variaciones después de una semana, aumentos y disminuciones del CTO. Los aumentos en estaciones de latitudes aurorales y de latitudes polares, todas en longitudes bajas o muy altas, independientemente sea de día o de noche, la precipitación se produciría no sólo por choque.
- las disminuciones se observan en las estaciones en latitudes polares, todas estaciones en longitudes entre 80º y 160º, ubicadas en el amanecer y el día al momento de la EMC.
- las disminuciones diurnas y los aumentos nocturnos del CTO no pueden explicarse mediante la química por lo cual se infiere que es una cuestión dinámica.

REFERENCIAS

[1] Gonzalez, Walter D.; Joselyn J. A.; Kamide Y.; Kroehl H. W.; Rostoker G.; Tsurutani B. T. and Vasyliunas V. M., 1994. What is a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res*., **99**, 5771-5792.

[2] Akasofu, Syun-Ichi, 2002. Exploring the Secrets of the Aurora, *Kluwer Academic Publishers*. 235 pp.

[3] Koskinen, Hannu E. J., 2011. Physics of space storms. From the solar surface to the earth, 439pp, *Springer Heidelberg Dordrecht London New York*, ISBN 978-3-642-00310-3 // e-ISBN 978-3-642-00319-6 // DOI 10.1007/978-3-642-00319-6.

[4] [12] [15] [22] [24] [26] Hargreaves, J. K., 1992. The solar-terrestrial environment. An introduction to geospace - The Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere, 434pp., *Cambridge Univ. Press*, New York and Australia.

[5] Kamide Yohsuke and Chian A. C.-L., 2007. Handbook of the solar-terrestrial environment, 539pp, *Springer Berlin Heidelberg New York*, ISBN 978-3-540-46314-6 - Book DOI: 10.1007/b104478.

[6] [8] [32] Lang, K. R., 2009. The sun from space, Second Edition, 583pp., *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, ISBN: 978-3-540-76952-1 // e-ISBN: 978-3-540-76953-8.

[7] Seppälä A.; K. Matthes; C. E Randall and I. A. Mironova, 2014. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II, *Progress in Earth and Planetary Science 2014 a Springer Open Journal,* 1:24. http://www.progearthplanetsci.com/content/1/1/24.

[9] Sugiura, Masahisa, 1964. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. *Annals of the International Geophysical Year*. **35**, **49**, *Pergamon Press*, N.Y.

[10] Sugiura, Masahisa y Chapman S., 1960. The average morphology of geomagnetic storms with sudden commencement, *Abandl. Akad. Wiss. Göttingen Math. Phys. Kl., Sondernheft* Nr.**4**, Göttingen.

[11] Bartels J., 1949. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp. *IATME Bulletin*, 12e, **109**.

[13] [21] Walt Martin, 1994. Introduction to geomagnetically trapped radiation, 188pp., *Cambridge Univ. Press*, New York.

[14] [16] Alperovich L. S. and Fedorov E. N., 2007. Hydromagnetic waves in the magnetosphere andthe ionosphere, *Springer*, 446pp, ISBN 978-1-4020-6636-8/e-ISBN 978-1-4020-6637-5.

[17] Reeves, G. D., 1998. Relativistic electrons and magnetic storms: 1992– 1995, *Geophys. Res. Lett.*, **25**(11), 1817– 1820. [18] Horne, R. B., and Thorne R. M., 2003. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(10), 1527, doi:10.1029/2003GL016973.

[19] Thorne, R. M., O'Brien T. P., Shprits Y. Y., Summers D. and Horne R. B., 2005. Timescale for MeV electron microburst loss during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res*., **110**, A09202, doi:10.1029/2004JA010882.

[20] [33] [34] [37] [39] [40] [42] [45] Clilverd, M. A.;. Rodger C. J;. Millan R. M; Sample J. G.; Kokorowski M.; McCarthy M. P.; Ulich T.; Raita T.; Kavanagh A. J. and Spanswick E., 2007. Energetic particle precipitation into the middle atmosphere triggered by a coronal mass ejection, *J. Geophys. Res*., **112**, A12206, doi:10.1029/2007JA012395.

[23] [25] Gianibelli, J. C. y Quaglino N., 2000. Glosario de términos utilizados en relaciones terrestres solares, *Departamento de Geomagnetismo y Aeronomía, Universidad de La Plata*, Argentina.

[27] [31] Prölss G. W., 2004. Physics of the Earth's space environmen: an introduction, 519pp, *Springer Berlin Heidelberg New York*, ISBN 3-540-21426-7, Alemania.

[28] Horne, R. B., and Thorne R. M., 2000. Electron pitch angle diffusion by electrostatic electron cyclotron harmonic waves: the origin of pancake distributions, *J. Geophys. Res*.,**105**, 5391-5402.

[29] Summers D. and Thorne R. M., 2003 - Correction 2005. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res*, vol. **108**, NO. A4, 1143, doi:10.1029/2002JA009489
[30] [41] [43] Clilverd, M. A., Rodger C. J. and Ulich T., 2006. The importance of atmospheric precipitation in storm-time relativistic electron flux drop outs, *Geophys. Res. Lett*., **33**, L01102, doi:10.1029/2005GL024661.
[35] [36] [38] Wang, J.; Zhao M. and Zhou G., 2009. Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20, *The Astrophysical Journal*, **690**: 862–874, 2009 January 1, doi:10.1088/0004-637X/690/1/862.
[44] Ono, T., 1987. Temporal variation of the geomagnetic conjugacy in Syowa – Iceland pair, *Men. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue,* **48**, 46-57.



ISBN 978-987-1323-50-0



UNCUYO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

Comisión Nacional de Energía Atómica

ices
INTERNATIONAL CENTER FOR EARTH SCIENCES

AGENCIA

FUNDACIÓN WILLIAMS